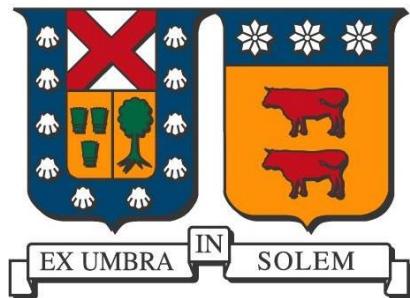


UNIVERSIDAD TÉCNICO FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO-CHILE



“MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA
ANDINA USANDO EL SOFTWARE TETIS Y LA
EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESPACIAL
DE LA PRECIPITACIÓN”

Memoria de titulación presentada por:

Sebastián Andrés Contreras Aracena

Como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía:

Lina Castro Heredia

Julio 2021

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia, que fue mi apoyo y contención durante todos estos años universitarios. A mis papás, a mi hermano Claudio, a mi abuelo Guillermo, y a mis abuelas María Teresa y Amparo. A los que están en el más allá, mi abuelo Claudio Contreras a quien admiro y quiero mucho, y asimismo a mi bisabuela Rebeca, que aún recuerdo que una vez me dijo con toda seguridad que iba a terminar mi carrera, incluso cuando ni yo lo creía posible.

Agradecer a mi profesora Lina Castro, quien confió en mí y me ofreció la posibilidad de realizar el trabajo de memoria con ella. Sin sus conocimientos y su apoyo en los peores momentos no hubiese sido posible su desarrollo.

Por último, agradezco a la universidad de permitirme conocer amistades tan buenas como Omar Mera, Sebastián Olea, Sebastián San Martín, Mauricio Finlez, Ximena Cáceres y Macarena Fernández, sin los cuales nada sería lo mismo. También, agradecer a otras amistades y gente que prestó su ayuda de forma inesperada, y con quienes se vivieron buenas anécdotas.

RESUMEN

La precipitación es un fenómeno climatológico que involucra una alta variabilidad espacial: dicha característica se agudiza en cuencas de montaña, tanto por su tamaño como por la baja densidad de estaciones pluviométricas con las que cuentan. En este contexto, la modelación hidrológica distribuida permite reproducir la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados en el proceso hidrológico mediante las forzantes meteorológicas empleadas, y dentro de ellas, la precipitación. Además, incluye procesos de gran importancia para la modelación de cuencas de montaña, como lo es el derretimiento de nieve, cuyo aporte a la escorrentía total puede ser significativo. Por otra parte, pese a que hay estudios que muestran que la incertidumbre espacial de las tormentas en la predicción de la escorrentía depende de factores como su organización espacial, como también del sistema de transporte propio de cada cuenca, no se han realizado estudios que lo evalúen de manera precisa en cuencas chilenas. Para ello, la presente memoria propone el empleo del modelo hidrológico distribuido TETIS, además de la utilización del nuevo conjunto de datos climatológicos CR2MET como series de entrada, para simular la escorrentía de una cuenca andina para un período de 10 años hidrológicos (2008-2018). Para esto, se elaboró una metodología que involucra la recopilación y tratamiento de los datos de entrada, como también de un proceso de Calibración y Validación, con el objeto de determinar una respuesta satisfactoria. Dicha calibración tiene como objetivo ajustar el modelo hidrológico a las funciones objetivo (FO) que relacionan caudal simulado vs observado, y asimismo SCA simulado vs SCA observado. Posteriormente, se evaluó la incertidumbre espacial mediante el empleo de parámetros de momento espacial de tormentas, los que indican su organización espacial, y permiten estudiar la influencia en el caudal observado. Finalmente, los resultados de la modelación hidrológica muestran un valor de la función objetivo KGE igual a 0.78 para caudal, junto con un valor de KGE igual a 0.56 de cobertura de nieve SCA para el Período de Calibración. Pero, en el Período de Validación, en términos de caudal se obtiene un valor de KGE igual a 0.56, junto con un valor de KGE igual a 0.31 de cobertura de nieve SCA. Esto se debe, entre otras cosas, a que las FO empleadas se enfocan en ajustarse a todo el registro de datos, sin captar adecuadamente los considerables cambios en el régimen climático (precipitación y temperatura) que ocurren en la cuenca de estudio, tanto en el Período de Calibración como en el Período de Validación. Por otro lado, los resultados de los parámetros de momento espacial muestran que: las tormentas ubicadas ligeramente aguas arriba del centroide de la cuenca, y con una leve distribución unimodal, conducen a los caudales peak más altos del período; mientras que las tormentas de mayor frecuencia tienden a adoptar una distribución espacial uniforme, y a ubicarse en el centroide de la cuenca.

ABSTRACT

The rainfall is a climatic phenomenon that involves a high spatial variability: such a characteristic is exacerbated on a context of mountain watersheds as much as their size, as their low density of rainfall stations they count on. On this context, the distributed hydrologic models allow to reproduce the spatial variability for the hydrologic processes involved by means of the meteorological inputs, and among them, the rainfall. Besides, in order to model mountain basins runoff, relevant processes like the snowmelt are included, whose contribution for the runoff could be significant. On the other hand, on context of runoff forecasting, despite there are many studies revealing the storm spatial uncertainty dependence on factors such as the spatial organization, as well as the drainage network structure of each basin, it has not been assessed in an accurate way in Chilean basins. Thus, the present work proposes the use of the distributed hydrologic model TETIS, besides the new meteorological database CR2MET, in order to achieve the runoff modelling for an Andean basin for a 10 hydrological years period (2008-2018). To achieve this goal, a methodology was developed which considers a stage of gathering and treatment for the input data, and then a calibration-validation process to achieve a successful response. Such calibration process aims to fit the hydrological model through the objective functions to both the simulated vs. observed runoff series and the simulated vs. observed snow cover area (SCA). Then, the spatial uncertainty was assessed using the spatial moment parameters of catchment rainfall, which indicate their spatial organization, and allow to study the impact in the runoff response. Finally, the hydrologic modeling for the Calibration period results show a KGE efficiency equal to 0.78 in terms of runoff response, together with a KGE efficiency equal to 0.56 for snow cover area criterion (SCA). Nevertheless, for the Validation Period results, a KGE efficiency equal to 0.56 is obtained for runoff response, together with a KGE efficiency equal to 0.31 for snow cover area criterion (SCA). Among other reasons, the objective functions used are aimed to fit the whole data series, without being able to capture the significant changes on the climate regime (rainfall and temperature) which happen in both the Calibration and Validation period at the study basin. With regard to the spatial moments of catchment rainfall, the results show: first, the storms slightly located above the catchment centroid, together with a slight unimodal distribution lead to the largest observed flows over the period; second, the most frequent storms tend to adopt an uniform spatial distribution, and to be located at the catchment centroid.

GLOSARIO

- **Snow Covered Area (SCA)**: Corresponde al porcentaje de cobertura de nieve de una cuenca determinada y que se considera un importante componente del ciclo hidrológico.
- **NSE**: Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe.
- **KGE**: Índice de eficiencia de Kling-Gupta.
- **MED**: Modelo de Elevación Digital.
- **HUS**: Hidrograma Unitario de Snyder.
- **Tormenta de alto impacto**: Tormenta que conduce a una escorrentía igual o mayor al percentil 95% en la estación Río Colorado.
- **FO**: Funciones Objetivo empleadas para la calibración del modelo hidrológico.

Tabla de Contenidos

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo General.....	3
1.2 Objetivos secundarios.....	3
1.3 Estructura del documento	3
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Modelos Hidrológicos	5
2.2 Modelo Hidrológico Distribuido: TETIS	7
2.3 Parámetros de momento espaciales de precipitación	20
3 ZONA DE ESTUDIO.....	23
3.1 Cuenca Hidrológica Río Colorado	23
3.2 Mapa Topográfico – MED	25
3.3 Características climáticas generales	25
3.4 Geología.....	27
3.5 Marco Hidrogeológico.....	29
3.6 Suelos.....	32
3.7 Uso de Suelos	33
3.8 Información Meteorológica	36
3.9 Información Fluviométrica	37
3.10 Imágenes satelitales Snow Cover	38
4 METODOLOGÍA	39
4.1 Preproceso: Recopilación y tratamiento de los mapas de entrada del modelo TETIS	41
4.2 Preproceso: Recopilación de parámetros del modelo TETIS	49
4.3 Preproceso: Tratamiento de series de caudal medio diario	51
4.4 Modelo Hidrológico	65
4.5 Obtención de SCA observados	65
4.6 Metodología Calibración-Validación	66
4.7 Evaluación de la incertidumbre espacial de la precipitación: Obtención de distancias de flujo ..	70

4.8	Hidrograma Unitario Sintético	72
5	RESULTADOS.....	73
5.1	Resultados del tratamiento de mapas.....	73
5.2	Datos de Caudal.....	81
5.3	Modelación Hidrológica.....	85
5.4	Evaluación de la incertidumbre de la espacialidad de la precipitación	122
6	CONCLUSIONES.....	131
	REFERENCIAS	133
	ANEXOS.....	137
	ANEXO I: Datos Extremos – Estación Río Colorado vs Estación Río Maipo	138
	ANEXO II: Distancia de Flujo – Puntos CR2MET	145
	ANEXO III: Diferencias entre datos grillados CR2 y estaciones climatológicas de precipitación	146
	ANEXO IV: Modelación Hidrológica – Mapas de entrada TETIS	148
	ANEXO V: Diagramas de Dispersion	153
	ANEXO VI: Consideraciones Generales – Software TETIS	155

Tabla de Figuras

Figura 2-1 : Clasificación de Modelos Hidrológicos. Fuente: Elaboración propia	6
Figura 2-2: Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS. Fuente: (Ramos Fernández & Francés García, 2014)	9
Figura 2-3: Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS. Fuente: (GIHMA, 2020).....	11
Figura 2-4: Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía. Fuente: (Montoya Monsalve, 2008)	11
Figura 2-5: Representación tridimensional del punto ideal y la distancia euclíadiana. Los ejes muestran las componentes que definen la función objetivo. Fuente: (Gupta et al., 2009)	19
Figura 2-6 : Caracterización de los parámetros de incertidumbre. Fuente: (Douinot et al., 2016).....	21
Figura 3-1: Mapa de localización de la cuenca del Río Colorado. Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 3-2: Mapa MED de zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	25
Figura 3-3 : Zonas Climáticas Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia	26
Figura 3-4: Régimen precipitación y temperatura Estación "Maitenes Bocatoma"	27
Figura 3-5: Unidades litológicas Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia	28
Figura 3-6 : Zona de Interés Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia	30
Figura 3-7: Mapa Suelos Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia	33
Figura 3-8: Porcentajes de cobertura de suelos. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 3-9: Cobertura de Suelos Cuenca "Río Colorado". Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 3-10: Mapa Grillado CR2 de zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 4-1: Esquema Metodológico. Fuente: Elaboración Propia.....	40
Figura 4-2 : Codificación de dirección de flujo D8 de ArcGIS. Fuente: Obtenido de https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm	42
Figura 4-3: Codificación de dirección de flujo D8 de QGIS. Fuente: Obtenido de https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/taudem/basic_grid_analysis_tools.html	42
Figura 4-4: Datos de Caudal "Río Colorado". Fuente: (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013)	52

Figura 4-5: Diagrama Boxplot de Caudal Medio Diario - Estación Río Colorado. El diagrama BoxPlot incluye la media (representado por el símbolo '+'), la mediana (representado por la línea horizontal central), el percentil 25% (representado por el borde inferior de la caja) y el percentil 75% (representado por el borde superior de la caja). Los bigotes superior e inferior indican los percentiles 99% y 1%, respectivamente.....	53
Figura 4-6: Comparación de datos de caudal con P99% - est Río Colorado.....	53
Figura 4-7: Ubicación de estaciones fluviométricas y puntos CR2.....	54
Figura 4-8: Datos de Caudal “Río Maipo”. Fuente: (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013)	55
Figura 4-9: Diagrama Boxplot de Caudal Medio Diario – Estación Río Maipo	56
Figura 4-10: Comparación datos fluviométricos y pluviométricos - Mayo 2008.....	57
Figura 4-11: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Junio 2008.....	58
Figura 4-12: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Septiembre 2009	59
Figura 4-13: Ubicación cuencas y estaciones fluviométricas. Fuente: Elaboración propia	60
Figura 4-14: Datos de Caudal: Río Colorado y Río Maipo. Fuente: Elaboración Propia	61
Figura 4-15: Gráfico de dispersión – Caudal Río Colorado (x) y estación Río Maipo (y).....	61
Figura 4-16: Mapas MED empleados en modelo hidrológico.....	65
Figura 4-17: Series de SCA Observados con MODIS de la cuenca del Río Colorado.	66
Figura 4-18: Funciones objetivo (FO) empleadas para el proceso de calibración de parámetros	68
Figura 4-19: Metodología propuesta para Calibración-Validación	69
Figura 4-20: Mapa de distancia de flujo de cuenca Río Colorado.....	71
Figura 5-1: Mapa de pendientes, velocidad, acumulación y dirección de flujo (señalados de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha).....	76
Figura 5-2: Mapa Kp-Ksa y Mapa Kps (señalados de izquierda a derecha)	77
Figura 5-3: Mapa Ks-Kss y Mapa AWC-TOP (señalados de izquierda a derecha)	78
Figura 5-4: Mapa de Uso de Suelo, Mapa de Almacenamiento de charcos y Mapa de Profundidad de raíces (señalados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo)	79
Figura 5-5: Mapa Hu y Mapa Alm-Superficial (señalados de izquierda a derecha)	80
Figura 5-6: Datos rellenos - Método de Transposición de Caudales	82
Figura 5-7: Datos rellenos – Método de Regresión Lineal	83

Figura 5-8: Datos rellenados – Método de Correlación Ortogonal.....	84
Figura 5-9: Datos de Caudal Medio Diario utilizados en la modelación hidrológica	85
Figura 5-10: Hidrograma observado vs simulado - Modelación Hidrológica - Valores iniciales	87
Figura 5-11: X - Flujos de Entrada - Modelación Valores Iniciales.....	88
Figura 5-12: Y - Flujos de Salida - Modelación Valores Iniciales	89
Figura 5-13: J - Almacenamientos Medios - Modelación Valores Iniciales	89
Figura 5-14: Hidrograma observado vs simulado – Modelación Hidrológica - Etapa 1	92
Figura 5-15: X - Flujos de Entrada - Modelación Etapa 1.....	94
Figura 5-16: Y - Flujos de Salida - Modelación Etapa 1	94
Figura 5-17: J - Almacenamiento Medio - Modelación Etapa 1	95
Figura 5-18: Diagramas de Dispersión - Factores Correctores.....	97
Figura 5-19: Diagramas de Dispersión - Parámetros Modelo de Fusión.....	98
Figura 5-20: Diagramas de Dispersión - Tanques de Estado Inicial	98
Figura 5-21: Hidrograma observado vs simulado – Modelación Hidrológica - Etapa 3	101
Figura 5-22: X - Flujos de Entrada – Modelación Etapa 3	103
Figura 5-23: Y - Flujos de Salida – Modelación Etapa 3	104
Figura 5-24: J - Almacenamiento Medio – Modelación Etapa 3	104
Figura 5-25: Hidrograma observado vs simulado – Modelación Hidrológica – Etapa 4 - Validación ..	106
Figura 5-26: X - Flujos de Entrada – Modelación Etapa 4 - Validación	107
Figura 5-27: Y - Flujos de Salida – Modelación Etapa 4 - Validación.....	108
Figura 5-28: J - Almacenamientos Medios - Modelación Etapa 4 - Validación	108
Figura 5-29: Series SCA observada vs simulada - Periodo de Calibración 2008-2015	121
Figura 5-30: Series SCA observada vs simulada - Periodo de Validación 2015-2018	122
Figura 5-31: Momentos espaciales $\Delta_1-\Delta_2$ para todo el período de estudio	123
Figura 5-32: Mapa de Calor - Nro. de eventos de tormenta vs $\Delta_1- \Delta_2$	124
Figura 5-33: Mapa de Calor – P50% & P99% de Precipitación Media vs $\Delta_1- \Delta_2$	124
Figura 5-34: Mapa de Calor – P50% & P99% de Caudal Observado Estación Río Colorado vs $\Delta_1- \Delta_2$	125
Figura 5-35: Evento Extremo 15-08-2008 – Análisis tormentas de alto impacto	128
Figura 5-36: Evento Extremo 05-09-2009 – Análisis tormentas de alto impacto	129
Figura 5-37: Evento Extremo 06-08-2015 – Análisis tormentas de alto impacto	130

Figura I.1: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Noviembre 2008.....	139
Figura I.2: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Diciembre 2008.....	140
Figura I.3: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Diciembre 2011.....	141
Figura I.4: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Enero 2016.....	143
Figura III.1: Comparación Precipitación Media CR2MET vs Estación Maipo en el Manzano y Estación Maitenes Bocatoma.....	147
Figura IV.1: Mapa MED.....	148
Figura IV.2: Mapa de Pendientes [m/m].....	148
Figura IV.3: Mapa de Direcciones de Flujo.....	149
Figura IV.4: Mapa de Celdas Acumuladas	149
Figura IV.5: Mapa de Almacenamiento Estático Hu.....	150
Figura IV.6: Mapa de Capacidad de Infiltración Ks.....	150
Figura IV.7: Mapa de Capacidad de Percolación Kp	151
Figura IV.8: Mapa de Conductividad Hidráulica del Interflujo Kss	151
Figura IV.9: Mapa de Velocidad de Ladera.....	152
Figura IV.10: Mapa de Códigos de Cobertura de Suelo	152
Figura V.1: Diagramas de Dispersión – Factores Correctores.....	153
Figura V.2: Diagramas de Dispersión – Tanques de Estado Inicial	154
Figura V.3: Diagramas de Dispersión – Parámetros de Fusión de Nieve.....	154
Figura VI.1: Ubicación Estación Fluviométrica en Mapa de Direcciones de Flujo.....	155
Figura VI.2: Esquema General Modelación Software TETIS	156
Figura VI.3: Pasos Intermedios Variación Datos de Entrada	157

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Características topográficas de la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración Propia.....	24
Tabla 3-2 : Características generales de zonas climáticas. Fuente: (Sarricolea et al., 2017).....	26
Tabla 3-3 : Descripción Unidad Litológica. Fuente: Elaboración Propia.....	29
Tabla 3-4: Leyenda de Ocurrencia de Aguas Subterráneas. Fuente: (Dirección General de Aguas , 1989)	
.....	31
Tabla 3-5 : Resumen de características hidrogeológicas de la cuenca de interés. Fuente: Elaboración propia	
.....	31
Tabla 3-6: Clases de Cobertura de Suelo. Fuente: (Hernández et al., 2016)	34
Tabla 3-7: Coberturas de Suelo predominantes del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia	35
Tabla 3-8: Denominación de usos de suelo. Fuente: Elaboración Propia.....	35
Tabla 3-9: Información estaciones fluviométricas. Fuente: Elaboración propia	38
Tabla 3-10: Convención de valores y descripción. Fuente: https://nsidc.org/data/mod10a2	38
Tabla 4-1: Mapas, formato y escala y mapas obtenidos. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 4-2: Leyenda del mapa Litoestratigráfico y de permeabilidades de España. Fuente: (IGME, 2020)	
.....	45
Tabla 4-3: Valores de permeabilidad adoptados en función de la categoría cualitativa. Fuente: (Tejada Espinoza, 2016).....	45
Tabla 4-4: Categorías asignadas a la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 4-5: Valores de conductividad hidráulica Ks. Fuente: Elaboración Propia.....	47
Tabla 4-6: Valores de AWC TOP de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 4-7: Valores estándar de profundidad de raíces y de almacenamientos de charcos. Fuente: Elaboración propia	48
Tabla 4-8: Valores adoptados de parámetros geomorfológicos de la cuenca de estudio. Fuente: (GIMHA, 2020)	50
Tabla 4-9: Valores asignados de Kc para la cuenca de estudio. Fuente: (Múnera & Francés, 2008)	51
Tabla 4-10: Indicadores estadísticos principales - Estación Río Colorado.....	52
Tabla 4-11: Datos extremos - est Río Colorado.....	54
Tabla 4-12: Características topográficas de cuenca “Alto Maipo”. Fuente: Elaboración propia	59

Tabla 4-13: Variables estadísticas de est. Río Colorado (x) y est Río Maipo (y).....	61
Tabla 4-14: Valores iniciales parámetros de modelación	67
Tabla 4-15: Constantes y Datos Geomorfológicos - HUS	72
Tabla 5-1: Resultados RMSE y EAM para cada método	84
Tabla 5-2: Resultados Caudal Peak y Volumen (observado vs simulado) - Modelación Hidrológica – Valores Iniciales.....	88
Tabla 5-3: Valores parámetros - Modelación Hidrológica - Etapa 1	92
Tabla 5-4: Resultados Caudal Peak - Volumen - Modelación Hidrológica - Etapa 1	93
Tabla 5-5: Rangos adoptados Factor Corrector - Diagramas de Dispersión	96
Tabla 5-6: Rangos adoptados Tanque Estado Inicial - Diagramas de Dispersión.....	96
Tabla 5-7: Rangos adoptados Parámetros Fusión de Nieve - Diagramas de Dispersión.....	96
Tabla 5-8: Rangos adoptados Factores Correctores - Optimización Global.....	100
Tabla 5-9: Rangos adoptados Tanques estado inicial - Optimización Global	100
Tabla 5-10: Rangos adoptados Parámetros de Fusión - Optimización Global	100
Tabla 5-11: Valores parámetros – Modelación Hidrológica Etapa Optimización Global.....	101
Tabla 5-12: Resultados Caudal Peak - Volumen - Modelación Hidrológica - Etapa 3	102
Tabla 5-13: Resultados Caudal Peak - Volumen - Modelación Hidrológica Etapa 4 – Validación	106
Tabla 5-14: Flujos de Salida - Variable	109
Tabla 5-15: Almacenamientos Medios - Variable	109
Tabla 5-16: Flujos de entrada - Variable	110
Tabla 5-17: Cambios en Resultados - Factores Correctores	112
Tabla 5-18: Cambios en Resultados - Estado Inicial Tanques de Almacenamiento	113
Tabla 5-19: Cambios en Resultados - Parámetros de Fusión de Nieve	113
Tabla 5-20: Resumen Factores Correctores	114
Tabla 5-21: Resumen Estado Inicial Tanques	114
Tabla 5-22: Resumen Parámetros de Fusión	115
Tabla 5-23: Resultados FO - Desempeño Cobertura de Nieve SCA	120
Tabla 5-24: Eventos de tormentas de alto impacto tratadas	126
Tabla 5-25: Tiempo al peak de caudal - HUS.....	127
Tabla 5-26: Tiempo al peak de caudal corregido - HUS	127

Tabla I.1: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Noviembre 2008.....	138
Tabla I.2: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Diciembre 2008	139
Tabla I.3: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Diciembre 2011	140
Tabla I.4: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Enero 2016	142
Tabla I.5: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Mayo 2008.....	143
Tabla I.6: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Junio 2008	144
Tabla I.7: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Septiembre 2009.....	145
Tabla II.1: Distancias de Flujo de Puntos CR2MET.....	145

1 INTRODUCCIÓN

Un desafío que existe en ingeniería civil es el modelamiento de la respuesta hidrológica de un sistema mediante el uso de modelos hidrológicos que se ajusten lo mejor posible a la situación real. Esto permite reproducir eventos pasados, también como una herramienta en la predicción o pronóstico de caudales de escorrentía futura, y para la evaluación de los recursos hídricos. En este contexto, los modelos hidrológicos se pueden clasificar según las ecuaciones utilizadas como probabilísticos o determinísticos. Paralelamente, los determinísticos también se diferencian de acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos que emplean como conceptuales, empíricos, físicamente basados y de caja negra; y en último lugar según su representación espacial en agregados, semidistribuidos como el software WEAP y distribuidos como TOPKAPI-ETH, TopNet o TETIS. En este marco, los modelos hidrológicos distribuidos conceptuales cuentan con una representación de la variabilidad espacial y temporal de las variables meteorológicas y de las características de la cuenca, además de incluir procesos físicos tan relevantes en cuencas andinas, como es el caso de la fusión de nieve. Dicho proceso es de gran importancia en la modelación, puesto que el derretimiento de nieve aporta un caudal considerable a la escorrentía total de la cuenca.

Con el objetivo de lograr una estimación y predicción de caudales satisfactoria, una de las problemáticas en la modelación hidrológica es la influencia de la variabilidad espacio-temporal de las tormentas y su impacto en la escorrentía resultante. Diversos estudios muestran una sensibilidad de la respuesta hidrológica a variables como el sistema de transporte del agua propio de cada cuenca (compuesto de laderas y cauces); como también al patrón de organización espacial de la tormenta (Zocatelli et al., 2010). Esto es de especial importancia en cuencas de montaña, tanto por su tamaño como por la escasez de estaciones climatológicas con las que cuentan.

En el caso de Chile, existen incusiones en la evaluación de la incertidumbre en la variabilidad espacial de la precipitación mediante modelos probabilísticos como el modelo multiGaussiano en la zona cordillerana de la Región del Maule, que recoge los resultados de dos tormentas del año 2002 a partir de un modelo de pronóstico del tiempo denominado MM5-DGF. Los resultados muestran que la incertidumbre no sólo depende de la configuración geométrica de los sitios con información, sino que varían de acuerdo al valor estimado en cada punto (Dussaubat et al., 2006). Por otro lado, también se ha evaluado la incertidumbre de las variables meteorológicas cuantificando la variación que sufren las series

de caudales medios mensuales de la cuenca del Río Pangal ubicada en la Región de O'Higgins, mediante el uso del modelo semidistribuido WEAP en un escenario de cambio climático. La incertidumbre se incorpora mediante parámetros como la división espacial de la cuenca, gradientes meteorológicos, series alternativas futuras y parámetros del modelo WEAP. En general, los resultados reflejan la necesidad de disminuir la incertidumbre inherente a la modelación hidrológica (Riquelme, 2010). A pesar de ello, no existen estudios que incluyan de manera precisa la variabilidad espacial propia de la precipitación, lo que motiva la necesidad de evaluar parámetros que consideren la organización espacial de la tormenta, tamaño (escala) y la heterogeneidad inherente de la morfometría de las cuencas. Por ende, se plantea la definición de parámetros de momento espacial, que incorporan la coordenada de distancia de flujo como variable fundamental (basado en la hipótesis de flujo constante), y que proveen información sobre la organización espacial de cada tormenta y su influencia en el hidrograma resultante (Zocatelli et al., 2011).

Teniendo en cuenta el problema que involucra la incertidumbre espacial de las tormentas y su influencia en la escorrentía resultante, el trabajo presenta una modelación hidrológica y posterior evaluación de la incertidumbre en la cuenca del Río Colorado, ubicado en la Región Metropolitana. En primer lugar, se elabora una metodología para la obtención y tratamiento de la información de entrada del modelo hidrológico. En cuanto a las series climatológicas de entrada, se utiliza el nuevo conjunto de datos CR2MET que incluye precipitación, temperaturas medias y extremas en una grilla rectangular de 0.05° latitud-longitud (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013) para el período 2008-2018. Posteriormente, se modela la cuenca hidrológicamente para el período señalado usando el software TETIS, donde se propone una solución de acuerdo a lo obtenido por las funciones objetivo de comparación de datos observados vs simulados de escorrentía y cobertura de nieve (SCA). En último lugar, se evalúa la incertidumbre espacial de tormentas mediante el cálculo de parámetros de momento, que describen la organización espacial de las precipitaciones, con el fin de estudiar su comportamiento para distintos eventos de *tormentas de alto impacto* en la zona de estudio.

1.1 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo consiste en modelar hidrológicamente una cuenca natural andina usando el software TETIS, en conjunto con una posterior evaluación de la incertidumbre espacial de la precipitación. Caso de estudio: Cuenca del Río Colorado, Región Metropolitana, Chile.

1.2 Objetivos secundarios

- > Caracterizar la cuenca hidrográfica de estudio y generar la información de entrada del software TETIS.
- > Calibrar y validar el modelo hidrológico en el período 2008-2018 a escala diaria, usando como entrada las series climatológicas CR2MET.
- > Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo hidrológico TETIS, con especial atención a los parámetros de fusión de nieve.
- > Evaluar la incertidumbre en la respuesta hidrológica en la cuenca del Río Colorado, considerando para esto eventos de precipitación invernales de alto impacto, mediante la metodología de cálculo de parámetros de momento espacial de tormentas.

1.3 Estructura del documento

La presente Memoria se estructura en los siguientes capítulos:

- Introducción: Se define la problemática que presenta la estimación de la escorrentía mediante la modelación hidrológica y el impacto que tiene la incertidumbre espacial de la precipitación. Posteriormente, se señalan algunos estudios previos sobre el tema; además de referirse a las ventajas que ofrece la modelación hidrológica distribuida. En último lugar, se plantean los objetivos y las actividades a desarrollar.
- Marco Teórico: En este capítulo se presenta una clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a diferentes criterios. Se señalan además las ventajas que ofrecen los modelos hidrológicos

distribuidos. Luego, se describen en profundidad los aspectos teóricos del modelo hidrológico TETIS utilizado para modelar la cuenca en estudio. Finalmente, se definen los parámetros de organización espacial usados para evaluar la incertidumbre.

- **Zona de Estudio:** En esta sección se describen los antecedentes de la cuenca del Río Colorado, para su posterior etapa de modelación hidrológica. Esto incluye su ubicación, topografía, geología y usos de suelo. Además, se presenta la información climatológica propuesta CR2MET y la información fluviométrica.
- **Metodología:** Esta sección desarrolla la metodología para la obtención de los datos de entrada del modelo TETIS, es decir: mapas de entrada, parámetros y factores. Luego, se detallan los métodos de relleno de la información fluviométrica faltante y el análisis de datos extremos realizado para la información resultante. Por otro lado, en la etapa de Calibración-Validación, se describe la metodología, funciones objetivo empleadas y los criterios adoptados para encontrar una solución para el período de estudio. En último lugar, se explica el procedimiento efectuado para determinar las distancias de flujo y el hidrograma unitario sintético, que será de utilidad en la evaluación y discusión de resultados de la incertidumbre espacial.
- **Resultados:** En esta sección se presentan los resultados del tratamiento de mapas de entrada y los datos de caudal empleados en la modelación hidrológica. Posteriormente, se exponen los resultados de la modelación hidrológica para el período de Calibración y Validación, de acuerdo a la metodología propuesta. Por último, se presenta la evaluación de la incertidumbre espacial, en conjunto con el análisis de eventos de tormenta de alto impacto, y que se apoya en comentarios sobre los resultados obtenidos para el período de estudio.
- **Conclusiones:** Se realizan comentarios finales respecto de los resultados obtenidos de la modelación hidrológica, además de los resultados de la evaluación de la incertidumbre espacial tratada en este trabajo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar según diferentes criterios: según las ecuaciones utilizadas, pueden ser modelos probabilísticos y determinísticos. Los primeros se basan en las leyes del azar o probabilidad, y se ajustan usando la estructura del azar observada en series hidrológicas temporales, por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. Los modelos determinísticos se basan en formulaciones físicas y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales, utilizando grupos de variables, parámetros y ecuaciones relacionadas; estos se clasifican en cuatro subgrupos en función de los procesos físicos que simulan: modelos empíricos, que emplean una estimación por tablas y extrapolación; conceptuales, que representan la cuenca como una serie de depósitos interconectados entre sí; físicamente basados, que usan parámetros medibles directamente; y los de caja negra, que utilizan como herramienta imprescindible la calibración (Ponce, 1994).

Los modelos se pueden diferenciar también según el grado de agregación; que pueden ser agregados o distribuidos de acuerdo al grado de discretización en la descripción de las características de la cuenca (Meijerink et al., 1994): los modelos distribuidos usan ecuaciones de conservación de masa, energía y movimiento para describir el movimiento de agua en superficies y en el subsuelo, usando técnicas de discretización numérica tal como es el caso de las diferencias finitas; y por otro lado los modelos agregados que incorporan valores integrados espacialmente. Para una mejor ilustración de lo anterior, se presenta a continuación en la Figura 2-1 la clasificación de los modelos hidrológicos.

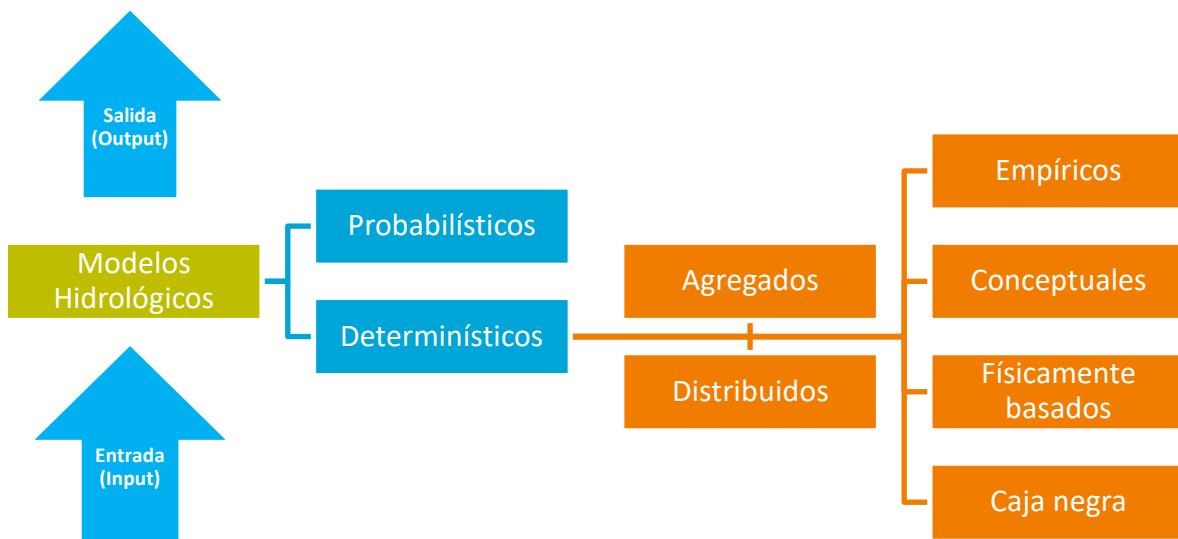


Figura 2-1 : Clasificación de Modelos Hidrológicos. Fuente: Elaboración propia

A diferencia de otros modelos, los modelos distribuidos conceptuales representan explícitamente la variabilidad espacial y temporal de los procesos involucrados en el ciclo hidrológico. Estos modelos utilizan una representación por división en mallas de celdas regulares (generalmente rectangulares) de igual tamaño, para lo cual requieren de información detallada de la zona de estudio obtenida en parte gracias al desarrollo de la cartografía digital, los sensores remotos y los sistemas de información geográfica (SIG). Dentro de esta información necesaria se incluyen series de datos meteorológicos, datos de suelo y cobertura de suelo e información sobre la hidrografía de la cuenca. La modelación hidrológica distribuida supone varias ventajas respecto de los modelos hidrológicos clásicos (semidistribuidos o agregados), considerando la mejor representación de la realidad en relación al ciclo hidrológico y los fenómenos asociados; además de entregar una mejor comprensión de los procesos a nivel de la cuenca. Cabe señalar además los avances tecnológicos actuales en los sistemas de información geográfica, cartografía digital, entre otros. (Vélez et al., 2009).

2.2 Modelo Hidrológico Distribuido: TETIS

El modelo hidrológico de tipo distribuido TETIS consiste en un modelo de lluvia-escorrentía que se desarrolló por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIHMA) perteneciente a la Universitat Politecnica de Valencia (UPV) a través del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). Este modelo realiza una discretización del espacio en celdas regulares que contienen información de parámetros físicos y que simulan el entorno de modelación. Se desarrolla con el propósito de simular el ciclo hidrológico en cuencas naturales, obteniendo de la mejor manera posible una respuesta ocasionada por la precipitación en forma de lluvia o nieve (GIHMA, 2020).

El software TETIS ofrece la posibilidad de representar procesos tales como: fusión de nieve (homogénea o distribuida en el espacio), laminación de embalses (válido también para modelación de lagos), y fenómenos kársticos. En cuanto a las aplicaciones que resaltan en este modelo se encuentra la lluvia y la escorrentía como procesos físicos en la estimación y predicción de crecidas. Dicho esto, el programa contiene un enfoque en los fenómenos de producción y traslación de la escorrentía. Por otro lado, si se desea realizar una evaluación y planificación de recursos hídricos, los fenómenos que resaltan son los de evapotranspiración y de flujo subterráneo.

2.2.1 Procesos Físicos

El objetivo de esta sección es explicar de manera sencilla y clara el funcionamiento de los procesos expuestos. De esta manera, en el modelo implementado se consideran los siguientes procesos hidrológicos:

- **Intercepción:** Es la fracción de la precipitación que es interceptada por objetos superficiales como la cubierta vegetal o los tejados. En general, la porción de esta agua interceptada nunca alcanza el suelo porque se adhiere y humedece estos objetos, para posteriormente evaporarse. La intercepción se desprecia cuando se estudian los eventos de crecida, pero cuando sea necesario conservar el balance hídrico este proceso puede llegar a ser importante y debe ser considerado.

- > Detención: También conocido como almacenamiento en depresión, se atribuye a la retención de agua por la forma del terreno o los usos de suelo, en donde el agua retenida no escurre superficialmente, debido a esto el agua se evapora o infiltra en el suelo. Este fenómeno puede llegar a ser significativo y puede modificar la respuesta de una cuenca.
- > Infiltración: Proceso de entrada de agua al suelo a través de la superficie del suelo. Este fenómeno es el más importante en un evento de crecida, ya que el agua no infiltrada es la escorrentía directa, que generalmente supone la fracción más grande de la escorrentía superficial.
- > Evapotranspiración: Corresponde al proceso mediante el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso mediante la transferencia de energía calorífica. Para el planeamiento de recursos hídricos este proceso debe ser considerado en detalle. Por otro lado, para los eventos de crecida suele despreciarse debido a los cortos lapsos de tiempo en los que se desarrollan.
- > Fusión de nieve: Es el proceso mediante el cual la cantidad de agua líquida producida por el derretimiento de la nieve que está acumulada en la superficie.
- > Percolación: Es el movimiento del agua infiltrada a través del perfil del suelo.
- > Recarga del acuífero: Proceso mediante el cual el agua ingresa al almacenamiento subterráneo del acuífero. El área de recarga es una zona que permite que se suministre agua al acuífero.
- > Escorrentía directa: Es la porción de lluvia que no es interceptada, detenida, evaporada o percolada y que fluye sobre las laderas. Cabe señalar que la escorrentía directa, la infiltración y la humedad del suelo interactúan entre sí, por esto se debe ser criterioso al momento de seleccionar el modelo adecuado para cada caso.
- > Interflujo: También denominado flujo subsuperficial. Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo o acuífero, por lo tanto, se considera en la escorrentía superficial.
- > Flujo base: Es la fracción de agua que deriva del almacenamiento subterráneo o de otras aguas que se han retrasado en el tiempo y que finalmente alcanzan el cauce.

2.2.2 Producción y Propagación de la Escorrentía

La producción de la escorrentía se realiza mediante esquemas conceptuales simples adaptados a la escala de la celda (inferior al tamaño de las laderas) y al intervalo de tiempo que se considera en la modelación

de eventos, que puede ser entre 10 minutos y 1 hora, o bien, en la planificación de recursos hídricos, a una escala diaria. Para representar la producción de la escorrentía se compone de seis tanques de almacenamiento interconectados entre sí (más un séptimo que representa el cauce y el proceso de traslación de la escorrentía), que representan los procesos físicos que tienen lugar en la cuenca como se observa en la Figura 2-2.

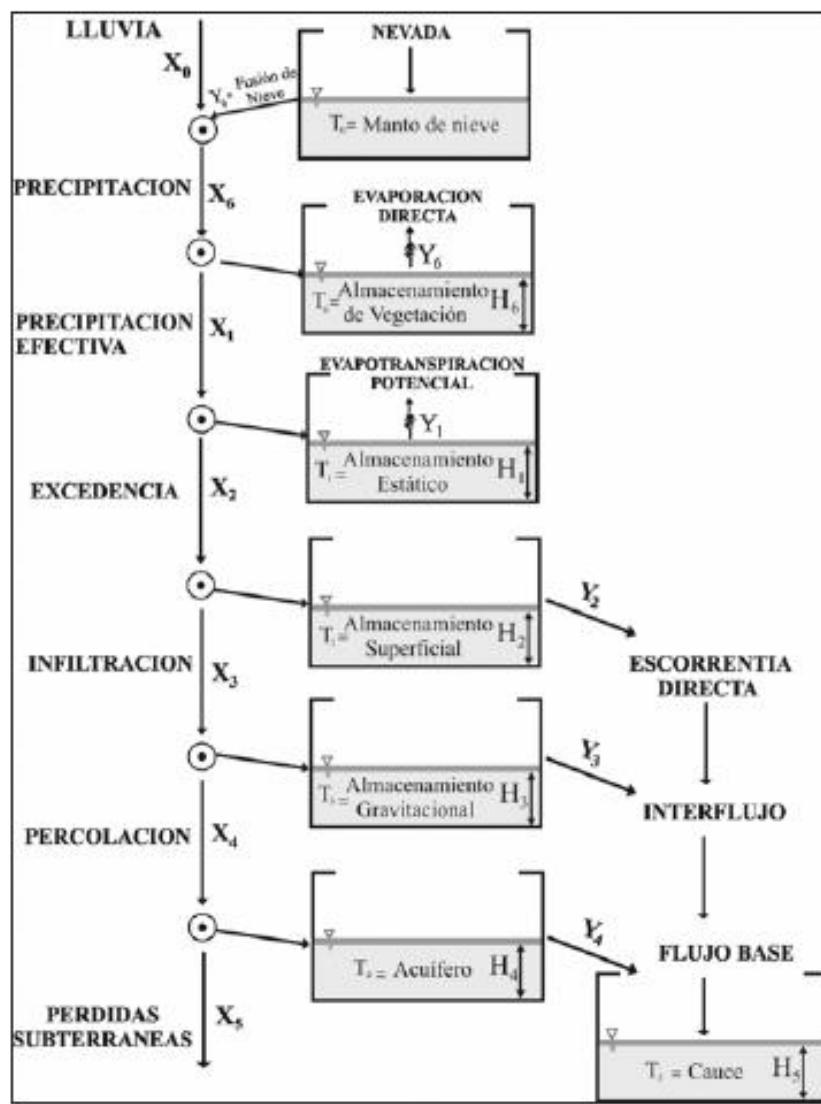


Figura 2-2: Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS. Fuente: (Ramos Fernández & Francés García, 2014)

En el software TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, en donde el flujo de agua entre los tanques es función del agua almacenada en cada uno de ellos, dicho esto las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

El tanque T_0 (tanque de manto de nieve) representa el almacenamiento de altura equivalente de agua (SWE), producto de las nevadas. La precipitación se considera como nieve y añadida a T_0 , si la temperatura del aire es inferior a una temperatura crítica (T_c). Es usual emplear una temperatura entre 0°C y 2°C (DeWalle & Rango, 2008). La nieve y la temperatura se interpolan en cada celda usando el método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW) (Francés et al., 2007). Debido a que generalmente no se cuenta con la información completa sobre radiación solar neta, energía sensible, energía latente, calor del suelo y energía advectiva, el modelo TETIS ocupa el método grado – día (Vélez J. J., 2003).

El T_1 (almacenamiento estático) representa el agua que transita por la cuenca y que solo sale de ella por evapotranspiración, por ende no forma parte de la escorrentía (Vélez J. I., 2001). Esto se conoce como el almacenamiento estático (H_u), que considera la interceptación, la detención del agua en charcos y el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares (Francés et al., 2007). Cabe señalar que al superar su máxima capacidad, traspasa el agua al tanque (T_2) de almacenamiento superficial.

Los tanques de almacenamiento restantes (T_2 , T_3 y T_4) tienen una conexión tridimensional de cada celda con las celdas contiguas (ver Figura 2-3); en el tanque de almacenamiento en superficie (T_2) se produce escorrentía directa, en el tanque de almacenamiento gravitacional (T_3) se produce interflujo y en tanque que representa el acuífero (T_4) se genera el flujo base. Dichos flujos siguen las direcciones de acuerdo al modelo de elevación digital de terreno (MED), hasta alcanzar la red de drenaje compuesta por cárcavas y cauces.

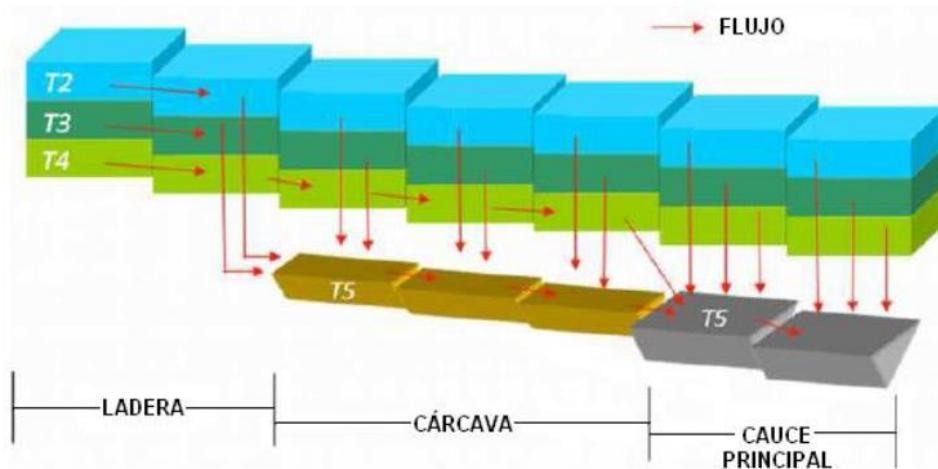


Figura 2-3: Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS. Fuente: (GIHMA, 2020)

En la Figura 2-4, se observa como el sistema se compone de 3 elementos bien diferenciados que se encuentran definidos por sus áreas umbrales para que los distintos componentes de la escorrentía salgan a la superficie. Esta relación permite diferenciar, según el área umbral, a qué componente de la escorrentía puede aportar la celda de origen: flujo base, interflujo y escorrentía directa.



Figura 2-4: Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía. Fuente: (Montoya Monsalve, 2008)

Posterior al balance hidrológico que ocurre en cada celda y de cuantificar los flujos o salidas de escorrentía directa, interflujo y flujo base, que a su vez se hacen parte de la escorrentía total, el siguiente paso consiste en la propagación o traslación de agua a través de las cárcavas y cauces que conforman la red de drenaje. Dicha traslación a lo largo de la cuenca considera que el agua no abstraída circula sobre las laderas hasta alcanzar algún canal perteneciente a la red de drenaje natural de la cuenca.

Para lograr lo dicho anteriormente, el modelo TETIS emplea el método de “Onda Cinemática”, que consiste en una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant, que desprecia los efectos inerciales y de presión en la ecuación de conservación de la energía. En cuanto a las características hidráulicas de los cauces, el modelo se basa en parámetros propios de la cuenca extraídos de la información geomorfológica. El modelo emplea nueve parámetros geomorfológicos (coeficientes y exponentes) para las diferentes relaciones potenciales geomorfológicas existentes y que se encuentran en mayor detalle en (GIHMA, 2020).

2.2.2.1 Modelo de Fusión de Nieve: Método de Índice Temperatura

La modelación de la fusión de nieve debe tener en cuenta obligatoriamente dos componentes básicas, la acumulación y el derretimiento (fusión). El método índice temperatura o grado-día se caracteriza por usar factores de fusión invariantes en el espacio (M_f). Dichos factores se diferencian según si el día presenta o no eventos de lluvia.

El método de índice temperatura incorpora como datos de entrada la precipitación y la temperatura ya interpolados espacialmente mediante el inverso de la distancia al cuadrado (IDW). Para distinguir entre la componente sólida y líquida de la precipitación, el modelo emplea una temperatura límite o umbral, que en TETIS se conoce como la temperatura base (T_b), que suele oscilar entre -2.0 °C a 4 °C. En otras palabras, cuando la temperatura del aire (T_a) sea menor a la temperatura base, esta se considera en forma de nieve (precipitación sólida), y por ende se almacena en el tanque T_0 . En caso contrario pasará a ser parte de la escorrentía como una precipitación líquida del modelo hidrológico (Orozco Medina, 2014). De forma general, el modelo emplea la siguiente ecuación:

$$M = M_{f1,2} * (T_a - T_b) \rightarrow T_a \geq T_b$$

$$M = 0 \rightarrow T_a \leq T_b$$

Donde:

- M = tasa de fusión de nieve [mm/día]
- M_{f1} = coeficiente de fusión sin lluvia [mm/ $^{\circ}$ C * día]
- M_{f2} = coeficiente de fusión con lluvia [mm/ $^{\circ}$ C * día]
- T_a = temperatura media del aire [$^{\circ}$ C]
- T_b = temperatura base para la fusión [$^{\circ}$ C]

2.2.3 Parámetros Espaciales

Para representar la cuenca de estudio y además de simular las características geomorfológicas, y a partir del modelo de elevación digital del terreno (MED) usando las herramientas disponibles en el software QGIS, se obtienen los mapas que se detallan a continuación:

- > Mapa de pendientes.
- > Mapa de velocidad de flujo en ladera.
- > Mapa de direcciones de flujo.
- > Mapa de celdas drenantes acumuladas.

Debido a que TETIS es un modelo hidrológico distribuido, debe asegurar que los parámetros del sistema también lo estén, buscando que la representación sea coherente y se ajuste lo mejor posible a la variabilidad espacial real de la cuenca y de acuerdo al tipo de geología, litología, usos de suelo, cubierta vegetal, entre otros. Con esta información se generan los mapas de parámetros del modelo, que posteriormente están sujetos al ajuste mediante factores correctores, entregando como resultado parámetros efectivos que reproducen mejor la realidad de cada cuenca (Montoya Monsalve, 2008). Los mapas de parámetros que considera TETIS se describen a continuación:

- > Almacenamiento estático H_u : Esta capa se obtiene a partir de la capacidad de almacenamiento capilar y de las abstracciones iniciales. Para obtener esta capa se necesitan el mapa de pendientes, el de usos del suelo, texturas del suelo y profundidades del suelo.

- > Permeabilidad superficial o conductividad hidráulica saturada del suelo k_s : Se utiliza para estimar la infiltración y el flujo subsuperficial. Esta capa se obtiene a partir de la textura del suelo, contenido de materia orgánica y de las funciones de pedo-transferencia
- > Capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso k_p : Se ocupa para estimar las pérdidas subterráneas y el flujo base. Esta capa se obtiene a partir del mapa de permeabilidad superficial y de la litología.
- > Tipo de cubierta vegetal y su factor de vegetación a lo largo del año λ_v : Se utiliza para estimar el comportamiento de la evapotranspiración a lo largo del año. Esta capa se obtiene a partir del mapa de usos de suelo y del factor de vegetación que depende del tipo y desarrollo del cultivo, así como del clima.

Las capas que se nombran a continuación se obtienen a partir de una aproximación de las capas anteriores

- > Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo $kss = ks$
- > Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso $ksa = kp$
- > Capacidad de percolación profunda o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso $kps = 0.1 * kp$

2.2.4 Estado inicial variables de estado

En el estado inicial del proceso de simulación hidrológica, cada variable de estado asociado a los procesos señalados en 2.2.1 requieren de la inicialización de un valor inicial, y que se considera como una de las

variables que presenta mayor incertidumbre. De ser necesario, se pueden asignar valores distintos para cada una de las distintas regiones geomorfológicamente homogéneas (GIHMA, 2020).

- > H_1 = Almacenamiento estático, con un valor en porcentaje de su capacidad máxima (0-100% del máximo)
- > H_2 = Almacenamiento superficial, como un valor de cantidad de agua disponible (mm).
- > H_3 = Almacenamiento gravitacional, como un valor de cantidad de agua disponible (mm).
- > H_4 = Estado inicial del acuífero, que está dado como una cantidad de agua al inicio del evento (mm).
- > H_5 = Caudal inicial circulante, que se introduce como un porcentaje del caudal a sección llena (0-1000% del caudal en sección llena).
- > H_6 = Estado inicial del tanque de intercepción, que está dado como un porcentaje del valor máximo de almacenamiento (0-100% del máximo).

2.2.5 Factores Correctores

Los factores correctores en el modelo TETIS tienen como objetivo el ajustar los parámetros espaciales que representan el sistema, por errores en la estimación inicial de parámetros, del propio modelo, en las series hidrometeorológicas que son input del modelo y en los efectos de la escala espacio-temporal. Esto se logra mediante un ajuste global de los parámetros espaciales.

La producción de la escorrentía se somete a los siguientes factores correctores:

- > FC_0 = Factor de escalamiento para diseño hidrológico
- > FC_1 = Almacenamiento estático
- > FC_2 = Evapotranspiración
- > FC_3 = Infiltración Gravitacional
- > FC_4 = Escorrentía Directa
- > FC_5 = Percolación

- > FC_6 = Interflujo
- > FC_7 = Flujo Subterráneo no conectado
- > FC_8 = Flujo Base

La propagación de la escorrentía a través del método de la Onda Cinemática Geomorfológica (OCG), se modifica por el siguiente factor corrector:

- > FC_9 = Velocidad de onda en la red fluvial

Se incluyen otros factores correctores que son considerados por TETIS como opcionales, para el caso en que se considere el sub-modelo de fusión de nieve. Estos son:

- > β = Factor de interpolación de la lluvia con la cota
- > M_{f1} = Coeficiente de fusión sin lluvia [mm/ $^{\circ}$ C dia] no distribuido
- > M_{f2} = Coeficiente de fusión con lluvia [mm/ $^{\circ}$ C dia] no distribuido
- > T_b = Temperatura base para la fusión de nieve

2.2.6 Calibración – Funciones Objetivo

En líneas generales la calibración de modelos se enfoca en obtener parámetros que representan de la mejor manera el sistema objeto de estudio; en donde los valores óptimos de éstos serán los que minimicen los errores residuales (Beven K. , 2000). Lo deseable es que se disponga de registros lo suficientemente largos (Beven K. , 1989), los que no siempre están disponibles. Además, la calibración se debe realizar desde un punto de vista físico para interpretar adecuadamente los parámetros y proporcionar una correcta interpretación de la variabilidad espacial. La calidad en los resultados de salida de un modelo conceptual lluvia-escorrentía depende de la calidad de los datos de entrada, de la estructura del modelo y de proceso de calibración (Sorooshian & Gupta, 1983; Madsen, 2000; Lidén & Harlin, 2000). Los elementos que pueden ser calibrados tanto manual o automáticamente en TETIS son los siguientes:

- > Los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía

- > Los valores iniciales de las variables de estado de almacenamiento
- > Los coeficientes de correlación con la altura para la interpolación espacial
- > Los parámetros agregados del modelo de nieve

La calibración manual en TETIS queda a juicio del experto, mientras que la calibración automática se realiza mediante un método de optimización conocido como el “Shuffled Complex Evolution – University of Arizona”, por sus siglas en inglés se conoce como SCE-UA. Dicho algoritmo de optimización se profundiza en (Duan et al., 1992).

Los principales resultados obtenidos por el modelo hidrológico TETIS son los caudales en el punto de aforo, los que se comparan con la información de caudales aforados; por ende, su eficiencia puede evaluarse de forma cualitativa y cuantitativamente. Para esto se realiza una inspección gráfica analizando qué tanto se asemeja el hidrograma de simulaciones respecto de las observaciones, de manera que sea posible identificar qué tanto se asemejan. Por otro lado, la utilización de estadísticos como es el caso del coeficiente de eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) que es de gran utilidad en la evaluación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía. En el caso del software TETIS se destacan los siguientes indicadores de eficiencia que se indican a continuación:

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Este coeficiente adopta valores en el rango desde $-\infty$ hasta 1. Un valor igual a 1 supone que el modelo se ajusta perfectamente; si es 0 quiere decir que el modelo se puede representar simplemente usando el valor promedio observado. Por último, los valores negativos sugieren que el modelo se comporta peor que si se trabaja con la variable de promedio observado como predictor (Bennett et al., 2013). Dicho esto, al emplear esta función objetivo, se busca maximizar su valor para un mejor desempeño del modelo hidrológico.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Donde:

Q_{obs} = caudal observado

Q_{sim} = caudal simulado

$\overline{Q_{obs}}$ = caudal medio observado

Error Cuadrático Medio (RMSE)

Este coeficiente adopta valores en el rango de 0 a ∞ . Calcula el error medio en las mismas unidades que la variable estudiada, lo que facilita la interpretación de los resultados. Un valor igual a 0 quiere decir que el modelo se ajusta perfectamente (Bennett et al., 2013). Luego, para optimizar un modelo hidrológico con esta función objetivo, se busca que su valor se minimice.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}$$

Donde:

Q_{obs} = caudal observado

Q_{sim} = caudal simulado

n = número de observaciones

Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)

Este índice de eficiencia se fundamenta en la interacción de los valores observados y simulados a partir de: la *correlación lineal*, la *razón entre la desviación estándar simulada y observada*, y la *razón entre la media simulada y observada*. La primera componente es una medida de la correlación lineal de los datos, la segunda indica la variabilidad relativa entre los valores observados y simulados, y la tercera es un índice del sesgo entre los valores observados y simulados. Los valores óptimos de cada parámetro corresponden al valor unitario, definiendo así el *punto ideal* cuando el modelo hidrológico alcanza simultáneamente dicho valor en todas las componentes (Gupta et al., 2009). A continuación, se muestran las ecuaciones para complementar lo señalado:

> r : Coeficiente de correlación lineal de Pearson.

- > $\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$: Razón entre desviación estándar simulada y observada.
- > $\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$: Razón entre media simulada y observada.

La definición del desempeño del modelo hidrológico se basa en el cálculo de la *distancia euclíadiana* (ED) con respecto al *punto ideal*, dada una combinación de los parámetros presentados. En base a esto, el índice de desempeño de *Kling-Gupta* (KGE) se define considerando que se encuentra sujeta a maximización, y que su valor ideal corresponde a la unidad. En la Figura 2-5 se muestra un ejemplo aplicado para un modelo hidrológico simple usando valores aleatorios de las componentes, en donde se visualiza el punto ideal en color verde y la distancia euclíadiana en color rojo. Adicionalmente, se presentan las ecuaciones que definen la función objetivo tratada (Gupta et al., 2009).

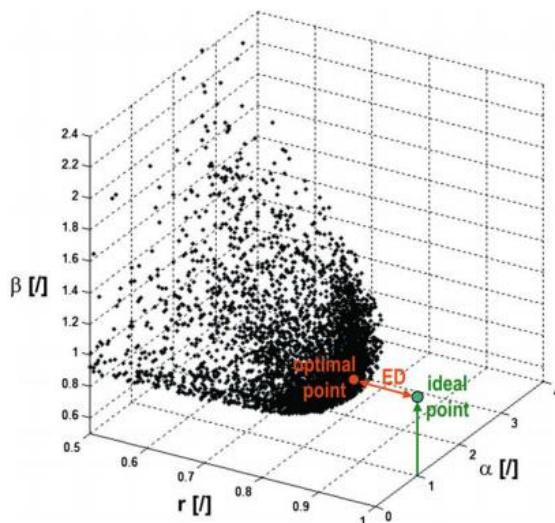


Figura 2-5: Representación tridimensional del punto ideal y la distancia euclíadiana. Los ejes muestran las componentes que definen la función objetivo. Fuente: (Gupta et al., 2009)

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$KGE = 1 - ED$$

2.3 Parámetros de momento espaciales de precipitación

Los parámetros de momento espacial proveen una descripción total de la organización espacial de la precipitación en un determinado instante t , como una función del valor de la intensidad de precipitación $r(x, y, t)$ en una posición (x, y) dentro de la cuenca; y además la distancia $d(x, y)$ entre la posición (x, y) y el punto de salida de la cuenca medido a lo largo del recorrido del flujo de agua. El momento espacial p_n de orden n se define en la siguiente ecuación (Zocatelli et al., 2011):

$$p_n(t) = |A|^{-1} \int r(x, y, t) d(x, y)^n dA$$

Donde:

A = Área de la cuenca hidrográfica

De forma análoga, el momento de la distancia de flujo g_n de orden n se expresa en la siguiente ecuación (Zocatelli et al., 2011):

$$g_n(t) = |A|^{-1} \int d(x, y)^n dA$$

Notar de la expresión anterior que la expresión de orden $n = 0$ recupera un valor unitario. Los parámetros de momento espacial adimensionales se obtienen de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\delta_1(t) = \frac{p_1(t)}{p_0(t)g_1}$$

$$\delta_2(t) = \frac{1}{g_2 - g_1^2} \left[\frac{p_2(t)}{p_0(t)} - \left(\frac{p_1(t)}{p_0(t)} \right)^2 \right]$$

El primer momento $\delta_1(t)$ describe la distancia del centroide de la precipitación sobre la cuenca, respecto del centroide de la cuenca. Por ende, valores cercanos a 1 reflejan una distribución de la precipitación concentrada y cercana a la posición del centroide de la cuenca, o bien una distribución espacialmente

homogénea; los valores menores a 1 indican que la precipitación se encuentra distribuida en una zona cercana al punto de salida de la cuenca; y por último valores mayores a 1 que la distribución de la tormenta se encuentra en la parte alta de la cuenca. Por otro lado, el segundo momento $\delta_2(t)$ se define como la dispersión de las distancias de flujo de la tormenta ponderadas en torno a su valor medio, con respecto a la dispersión de las distancias de flujo. En este sentido, cuando los valores de $\delta_2(t)$ son cercanos a 1 reflejan una distribución uniforme de precipitación; mientras que valores menores a 1 indican que la precipitación es caracterizada por una distribución unimodal a lo largo de la distancia de flujo; y en último lugar los valores mayores a 1 corresponden a casos de distribuciones de precipitación multimodales. La caracterización de los parámetros se muestra de manera gráfica en la Figura 2-6.

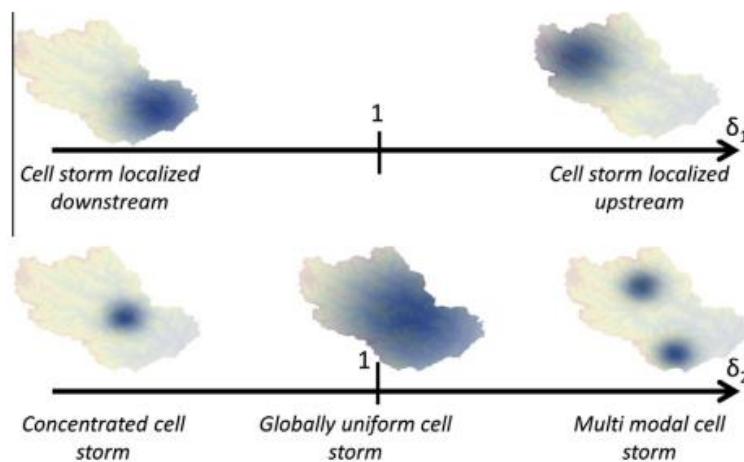


Figura 2-6 : Caracterización de los parámetros de incertidumbre. Fuente: (Douinot et al., 2016)

Los parámetros previamente definidos describen la organización espacial de la precipitación instantánea en un tiempo t . Asimismo, a partir de la integración sobre la variable temporal, las expresiones pueden describir la precipitación acumulada en un evento de tormenta de duración T_s , lo que entrega las siguientes ecuaciones:

$$P_n(t) = |A|^{-1} \int r_t(x, y) d(x, y)^n dA = \frac{1}{T_s} \int p_n(t) dt$$

Donde:

$r_t(x, y)$ = Integral de la intensidad de precipitación sobre la variable temporal en la ubicación (x, y)

En función de lo anterior, los parámetros de momento espacial quedan expresados según las siguientes expresiones:

$$\Delta_1 = \frac{P_1}{P_0 g_1}$$
$$\Delta_2 = \frac{1}{g_2 - g_1^2} \left[\frac{P_2}{P_0} - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \right]$$

3 ZONA DE ESTUDIO

3.1 Cuenca Hidrológica Río Colorado

La cuenca del “Río Colorado” se encuentra ubicada en la comuna de San José de Maipo perteneciente a la Región Metropolitana de Chile, delimitada por el lado este por la Cordillera de los Andes (frontera natural con Argentina), mientras que por el lado oeste delimita a unos kilómetros de distancia de Santiago. Dicha cuenca es definida a partir de la estación “Río Colorado antes Río Maipo”, o abreviadamente denominada como “Río Colorado”. En la Figura 3-1 se muestra el mapa de localización de la cuenca del “Río Colorado” en la comuna de San José de Maipo, donde se aprecian también las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca (ver información general en la tabla incrustada en la Figura 3-1) y la estación fluviométrica “Río Colorado”. La extensión de la cuenca es de 1663.8 km², presenta un régimen hidrológico pluvio-nival y una longitud del cauce principal del área de estudio de aproximadamente unos 66.1 km. En la Figura 3-1 se muestra la información topográfica de la cuenca de estudio.

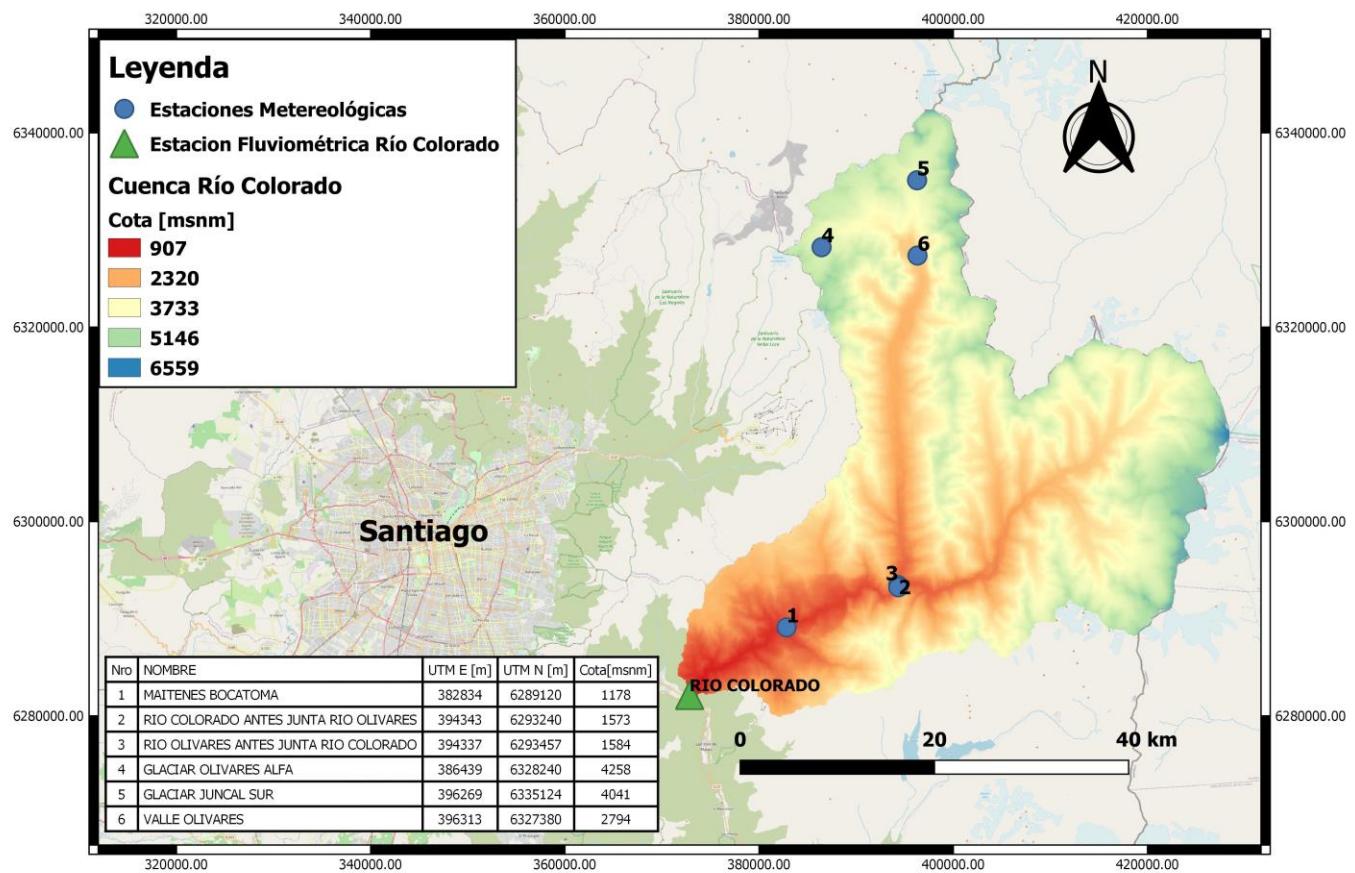


Figura 3-1: Mapa de localización de la cuenca del Río Colorado. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-1: Características topográficas de la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Área (km ²)	Elevación minima [m]	Elevación maxima [m]	Elevación Media [m]	Pendiente Media [%]
1663.78	907	6559	3426.37	53.46

3.2 Mapa Topográfico – MED

El modelo de elevación digital (MED) empleado para delimitar la cuenca hidrográfica del Río Colorado fue obtenido mediante las herramientas que provee el software QGIS. La descarga del mapa base proviene del *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) desarrollado por la NASA, y que se encuentra en formato ráster con un tamaño de celda de 90mx90m (Jarvis et al., 2008). Por la ubicación de la cuenca, fue necesario descargar dos archivos y luego unirlos mediante el uso de herramientas del software QGIS. El resultado se puede ver en la Figura 3-2 con más detalle.

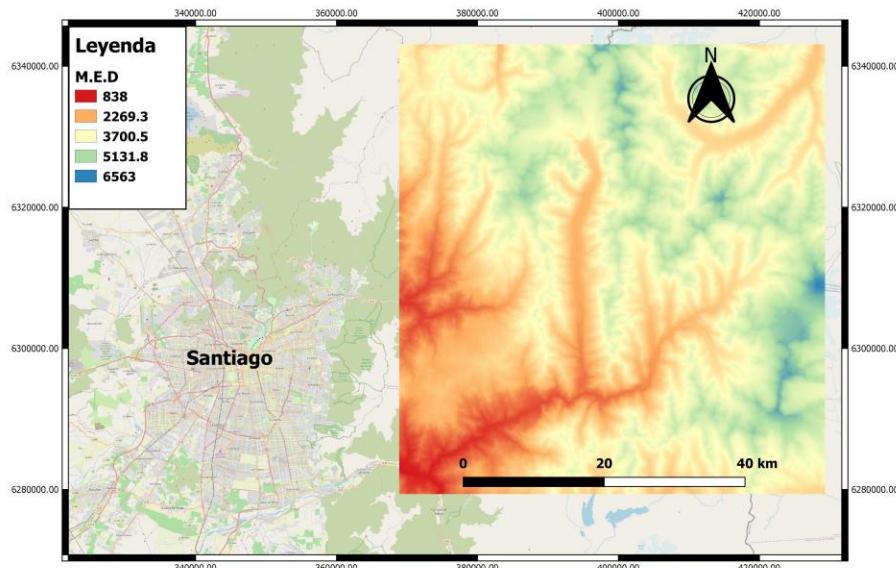


Figura 3-2: Mapa MED de zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

3.3 Características climáticas generales

La cuenca de estudio presenta 3 regiones climáticas definidas según el sistema de clasificación de Köppen - Geiger modificado (Sarricolea et al., 2017), que consta de una zona de clima mediterráneo de verano seco subpolar (Csc); una zona climática de clima mediterráneo de verano seco templado con influencia de

montaña (Csb (h)) y por último se presenta una región climática de tundra con verano seco (ET(s)). En la Figura 3-3 se aprecian las zonas climáticas de la cuenca, y que fue obtenido del mapa de zonas climáticas de Chile en escala 1:1.500.000 (Sarricolea et al., 2017). Las características tanto de temperatura y precipitación media anual se adjuntan en la Tabla 3-2.

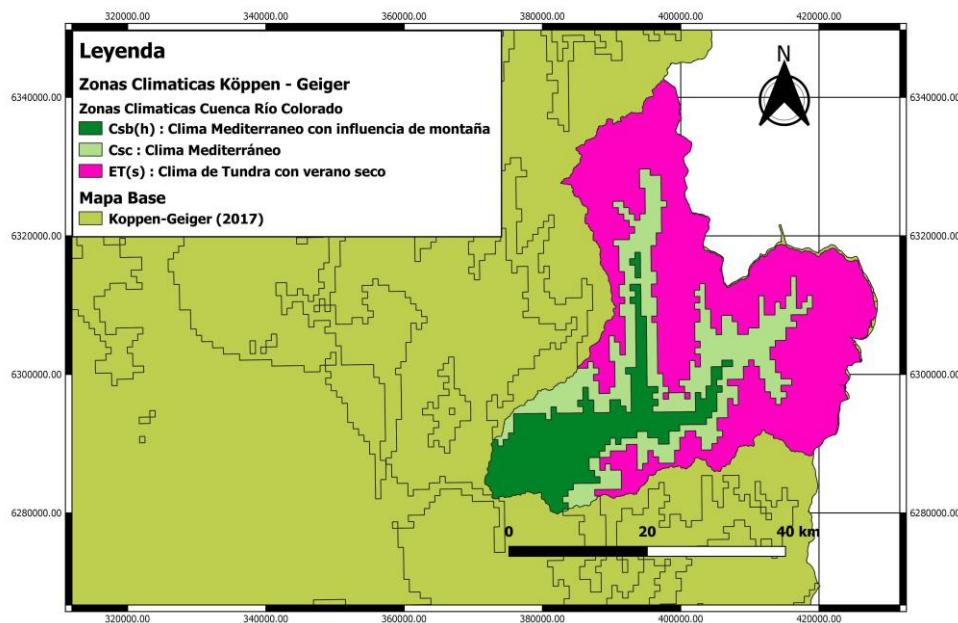


Figura 3-3 : Zonas Climáticas Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-2 : Características generales de zonas climáticas. Fuente: (Sarricolea et al., 2017)

Zona Climática	P_Media_Anual [mm]	T_Media_Anual [°C]
Csb(h): Clima mediterráneo con influencia de montaña	900	9
Csc : Clima Mediterráneo	900	6
ET (s) : Clima de Tundra de verano seco	700	3

De acuerdo a la información de la Tabla 3-2, el clima mediterráneo (Csb) se manifiesta de manera considerable de la cuenca, que presenta todos los meses temperaturas inferiores a los 22 °C y al menos cuatro meses con un promedio igual o superior a 10 °C; mientras que el régimen de precipitación presenta al menos tres veces más precipitación en el mes más húmedo del invierno que en el mes más seco del verano. Respecto del clima mediterráneo (Csc), se caracteriza por tener los meses más fríos con un promedio de más de 0 °C y con 1 a 3 meses con un promedio mayor a los 10 °C; los eventos de precipitación en los meses más húmedos del invierno son de al menos tres veces más que las de los meses

más secos del verano. Este clima es fuertemente influenciado por la altitud. En último lugar, el clima tundra de verano seco (ET(s)) presenta temperaturas superiores a los 0 °C pero no mayores a los 10 °C en el mes más cálido (Britannica, 2019).

En la Figura 3-4 se muestra el régimen de precipitaciones y temperaturas de la estación meteorológica “Maitenes Bocatoma” (ver Figura 3-1) ubicada dentro de la cuenca para el período 2008-2018. Se puede observar una tendencia clara a la baja de la precipitación anual en la cuenca, así como también un ligero aumento de la temperatura media anual.

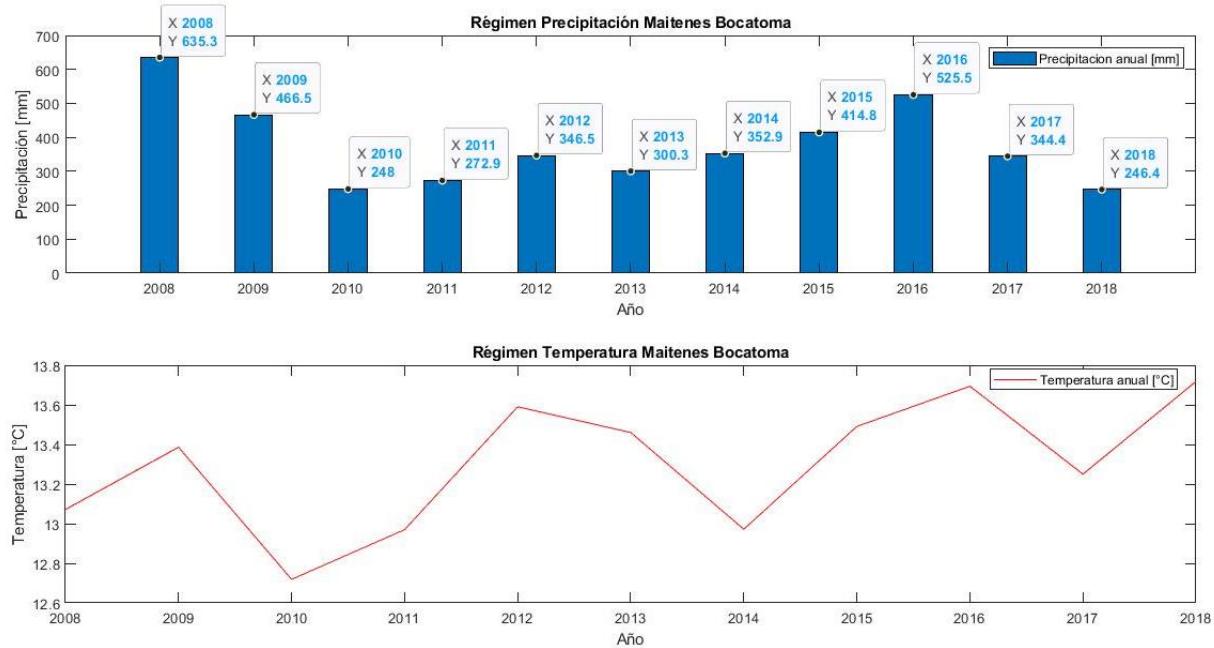


Figura 3-4: Régimen precipitación y temperatura Estación "Maitenes Bocatoma"

3.4 Geología

La información geológica de la cuenca será de utilidad para la etapa de generación de mapas de entrada del modelo hidrológico, puesto que es necesario contar con información del sustrato rocoso presente en la cuenca de análisis. En la Figura 3-5 se muestra el mapa geológico para la zona de estudio en escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003), donde se observan 5 unidades litológicas. Se destaca la presencia

de complejos volcánicos, secuencias volcánicas, secuencias sedimentarias marinas, secuencias volcano-sedimentarias y por último una zona que no cuenta con información.

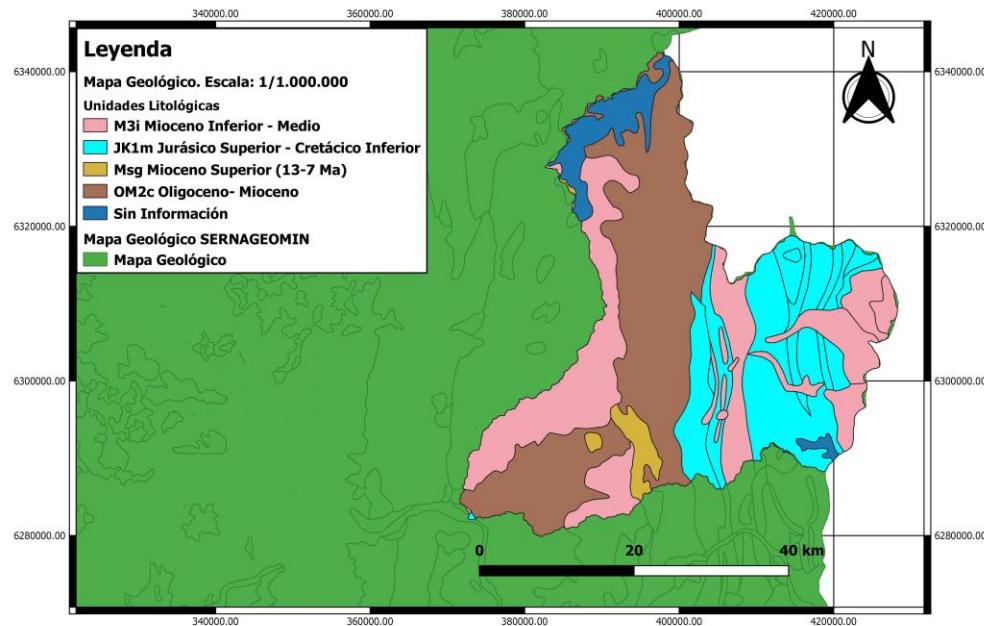


Figura 3-5: Unidades litológicas Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia

Se presenta en la Tabla 3-3 un resumen con las unidades litológicas de la zona de estudio, con su código identificador según la leyenda presentada en el mapa geológico de Chile escala 1:1000000 (SERNAGEOMIN, 2003). Cabe destacar que la composición de cada unidad litológica entrega información indispensable para definir los valores de permeabilidad del sustrato rocoso en etapas posteriores.

Tabla 3-3 : Descripción Unidad Litológica. Fuente: Elaboración Propia

Leyenda Mapa Geológico de Chile. 1:1000000 (Unidad Litológica)	Composición
M3i Mioceno Inferior-Medio	Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.
JK1m Jurásico Superior - Cretácico Inferior	Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas.
Msg Mioceno Superior (13-7 Ma)	Granodioritas de hornblenda y biotita, en menor proporción monzogranitos, monzonitas cuarcíferas y monzodioritas.
OM2c Oligoceno - Mioceno	Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.
Sin información	-

3.5 Marco Hidrogeológico

Uno de los parámetros de entrada del modelo conceptual TETIS es la conductividad hidráulica del acuífero, lo que en el caso de Chile se puede caracterizar mediante el mapa hidrogeológico de Chile en escala 1:1.000.000 (Dirección General de Aguas , 1989). Este mapa incorpora una leyenda sobre la ocurrencia de aguas subterráneas (ver Tabla 3-4), en función del tipo de permeabilidad que puede ser de tres tipos: primaria, secundaria y muy baja a ausente. Dicha clasificación se complementa con la importancia hidrogeológica relativa, que va desde una alta importancia hasta una nula importancia. Esto da origen a las distintas clases, junto con las principales formaciones asociadas y sus características generales. En la Figura 3-6 se muestra la zona de interés (demarcada con un contorno rojo segmentado) para la determinación de las características hidrogeológicas de la cuenca de estudio. De acuerdo a la información del mapa hidrogeológico de Chile y usando la leyenda de ocurrencia de aguas subterráneas

(ver Tabla 3-4), se pueden extraer los tipos de permeabilidad presentes en la cuenca. Esta información se muestra en la Tabla 3-5, que consta de 3 zonas, en donde las permeabilidades son muy bajas o ausentes.

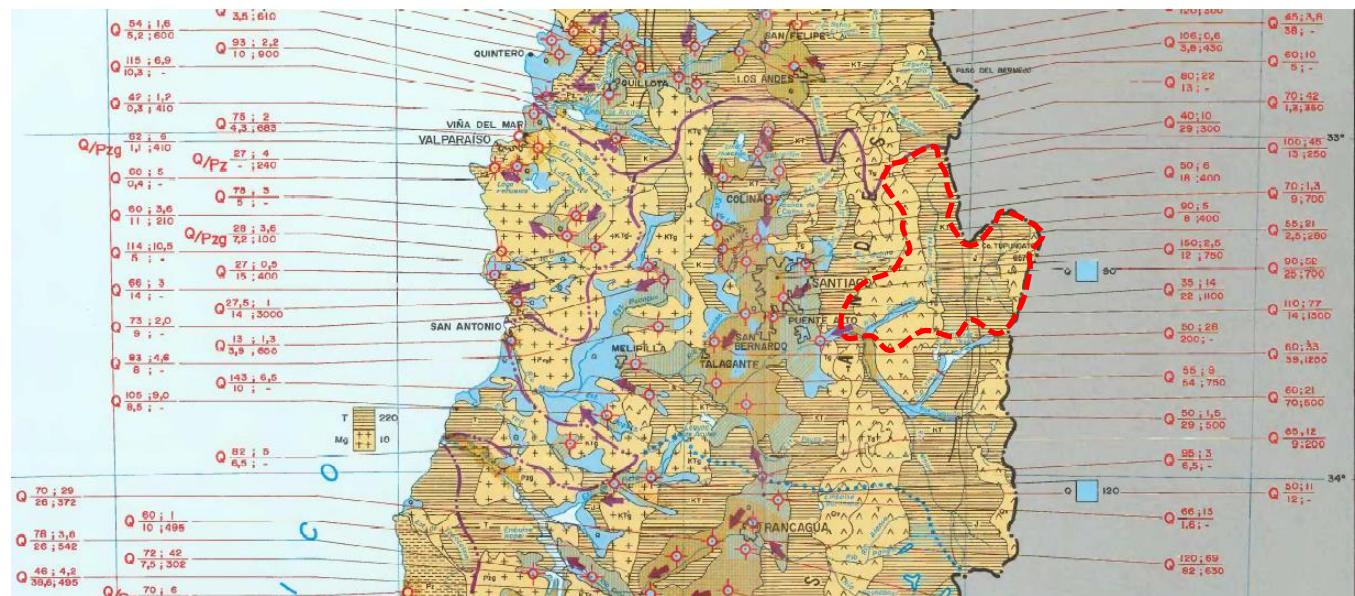


Figura 3-6 : Zona de Interés Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-4: Leyenda de Ocurrencia de Aguas Subterráneas. Fuente: (Dirección General de Aguas , 1989)

TIPO PERMEABILIDAD	SÍMBOLO	OCURRENCIA IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	PRINCIPALES FORMACIONES	OCURRENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
				CARACTERISTICAS GENERALES
PRIMARIA. (En formación piso)		ALTA A MEDIA	Q Qv T	DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS O RELLENO. Sedimentos fluviales, glaciares, marinas, lagos, arenales, arenas, salinas, salinas de extensión variable, generalmente estratificados. Nubes libres o semiconfinadas. Permeabilidad variable, calidad química variable. Son los acuíferos más conocidos, explotados del país. LAVAS POROSAS en Isla de Pascua.
		BAJA	T	DEPOSITOS CONSOLIDADOS O ROCAS SEDIMENTARIAS. Areniscas, lutitas, limolitas y arcillas de depósito lacustre o marino. Acuíferos de extensión variable, generalmente subyacentes a depósitos cuaternarios. En Pampa del Tamarugal y en el borde Oriental del Salar de Atacama, deficiente calidad química. Pampa Magallanes suriente, buena calidad química.
SECUNDARIA. (En roca)		MEDIA	T	ROCAS CARBONATADAS Calizas arenosas y lutitas calizas. Acuíferos semiestratificados sin explotar, calidad química deficiente. Cuenca del Colchagua.
		ALTA A BAJA	TQ T Ca	ROCAS YÚLLANICAS FRAGMENTADAS Coladas, tobas y brechas endécticas con intercalaciones de sedimentos clásticos continentales. Ignebitas riolíticas y dacíticas. Acuíferos poco explorados, de extensión e importancia poco conocida. Se atribuye carácter aguero a estas formaciones yúllanicas del Altiplano. Calidad química buena.
MUY BAJA A AUSENTE. (En roca)		MUY BAJA	Qv TQ T Ca J R	ROCAS VOLCÁNICAS Coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos, asociados a volcanes antiguos bien conservados o activos. En general no presentan características acuíferas. Cordillera de los Andes.
		MUY BAJA	TQ T KT K M J Pz.M	ROCAS SEDIMENTARIAS Y MIXTAS SEDIMENTARIO-VOLCÁNICAS Coladas, brechas, tobas o ignimbritas con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados. En general impermeables. Se consideran basamento de los relieves acuíferos.
		NULA	Ts JNs JTs JNs Pz Rg Ms	ROCAS DE LITÓNICAS E IMBROLICAS Intercalaciones graníticas. Basamento impermeable. Cordillera de la Costa, Cordillera Andina Patagoniana.
		NULA	Pw	ROCAS METAMÓRFICAS Y SEDIMENTARIAS Metamórficas: gneissos, filitos, esquistos, mafitas, anfibolitas, lutitas, cuarcitas. Basamento impermeable. Cordillera de la Costa, Cordillera Andina Patagoniana.
	?			SIN INFORMACIÓN

Tabla 3-5 : Resumen de características hidrogeológicas de la cuenca de interés. Fuente: Elaboración propia

Zona	Tipo de permeabilidad	Importancia Hidrogeológica Relativa	Características Generales
1	Muy baja a ausente	Muy Baja	Rocas volcánicas
2	Muy baja a ausente	Muy Baja	Rocas sedimentarias y mixtas sedimentario-volcánicas
3	Muy baja a ausente	Nula	Rocas metamórficas y sedimentarias

3.6 Suelos

La modelación hidrológica requiere de información de las clases de suelos presentes en la cuenca, para posteriores definiciones de mapas de entrada. La base de datos de suelos considerada en el presente estudio se basa en el proyecto Soil and Terrain (SOTER) database Programme, que es desarrollado en forma conjunta por la FAO e ISRIC (ISRIC World Soil Information, 2005). Dicho proyecto contiene un mapa a escala 1:5.000.000 para América Latina y el Caribe (SOTERLAC) (Batjes, 2005), que se apoya en el sistema de referencia mundial del recurso suelo (FAO, 2006).

En la Figura 3-7 se muestra el mapa de suelos para la zona de estudio, donde por inspección se puede determinar que los suelos predominantes son leptosoles, y en un menor grado cambisoles en la zona más alta de la cuenca. Los leptosoles se caracterizan por ser suelos muy someros sobre roca continua además de ser extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Estos suelos son particularmente comunes en regiones montañosas, como es el caso de la cuenca en estudio. Por otro lado, los cambisoles son suelos que presentan al menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo, lo que se refleja mediante cambios en la estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato (FAO, 2006). Es importante señalar que, para cada una de las regiones mostradas en la cuenca con su respectiva unidad de suelo, se considera como criterio que su proporción relativa en dicha región es mayor o igual a 50%.

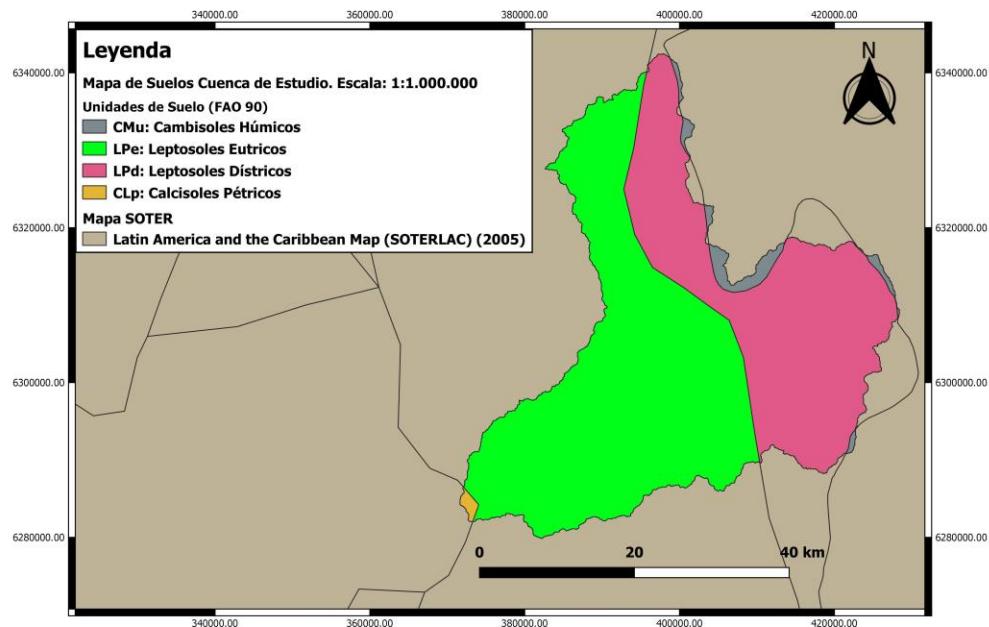


Figura 3-7: Mapa Suelos Cuenca de Estudio. Fuente: Elaboración Propia

3.7 Uso de Suelos

El uso de suelos también es parte de las bases de datos esenciales para la posterior modelación hidrológica, para contar con información sobre la cobertura vegetal presente en la cuenca. El presente estudio usa el mapa Land Cover Chile 2014, que es producto de un proyecto de colaboración internacional que incorporó a investigadores de China, Estados Unidos y Chile (Zhao et al., 2016). Dicho mapa se encuentra en formato ráster con una resolución espacial de 30x30m (Hernández et al., 2016). La definición del mapa se basa en que todas sus clases, en sus tres niveles, tuviesen equivalencias tanto en clasificaciones internacionales, por ejemplo, el sistema CORINE Land Cover de Europa (Hernández et al., 2016). A continuación, en la Tabla 3-6 se muestra el esquema de clases de LC usado para el mapa de coberturas de suelo:

Tabla 3-6: Clases de Cobertura de Suelo. Fuente: (Hernández et al., 2016)

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
100 Cultivos	110 Arrozales	
	120 Invernaderos	
	130 Otros Cultivos	
	140 Huertos	
	150 Barbechos	
200 Bosques	210 Nativo de Hoja Ancha	211 Primarios 212 Renovales
	220 Nativo de Coníferas	221 Primarios 222 Renovales
	230 Mixtos	231 Primarios 232 Renovales
	240 Plantaciones de Hoja Ancha	241 Adultas 242 Cosechas
	250 Plantaciones de Coníferas	251 Adultas 252 Cosechas
300 Pastizales	310 Praderas	311 Anuales 312 Perennes
	320 Otros Pastizales	
	330 Pastizales Áridos	
400 Matorrales	410 Matorrales	
	420 Matorrales Arborescentes	
	430 Suculentas	
500 Humedales	440 Plantación de Matorrales	
	450 Otros Matorrales Áridos	
	510 Marismas	
600 Cuerpos de Agua	520 Pantanos	
	530 Otros Humedales	
	610 Lagos	
	620 Reservorios	
800 Superficies Impermeables	630 Ríos	
	640 Océano	
	910 Salares	
	920 Suelos arenosos	
900 Tierras desnudas	930 Suelos rocosos	931 Rocas 932 Gravas
1000 Hielo y Nieves	1010 Nieve	
	1020 Hielo	
1200 Nubes	1200 Nubes	1210 Nubes

En la Tabla 3-7 se muestran las coberturas predominantes del área de estudio de acuerdo a la clasificación mencionada (Hernández et al., 2016). Considerando la clasificación presentada, en la Figura 3-8 se muestra un gráfico circular donde se informa el porcentaje de superficie que ocupa cada cobertura con respecto al área total de la cuenca, y en la Figura 3-9 se muestra el mapa de cobertura de suelos de la cuenca de estudio. Con esta información se puede afirmar que las tierras desnudas predominan en la cuenca de interés: gravas y rocas ocupan un 58.38% y 14.71% de la superficie total, respectivamente. Cabe destacar que para tratamientos posteriores se considerará la convención de usos de suelo presentado en la Tabla 3-8.

Tabla 3-7: Coberturas de Suelo predominantes del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
100 Cultivos	130 Otros Cultivos	
100 Cultivos	140 Huertos	
200 Bosques	210 Nativo de Hoja Ancha	212 Renovales
300 Pastizales	320 Otros Pastizales	
400 Matorrales	410 Matorrales	
900 Tierras Desnudas	930 Suelos Rocosos	931 Rocas
900 Tierras Desnudas	930 Suelos Rocosos	932 Gravas
1000 Hielo y Nieve	1010 Nieve	

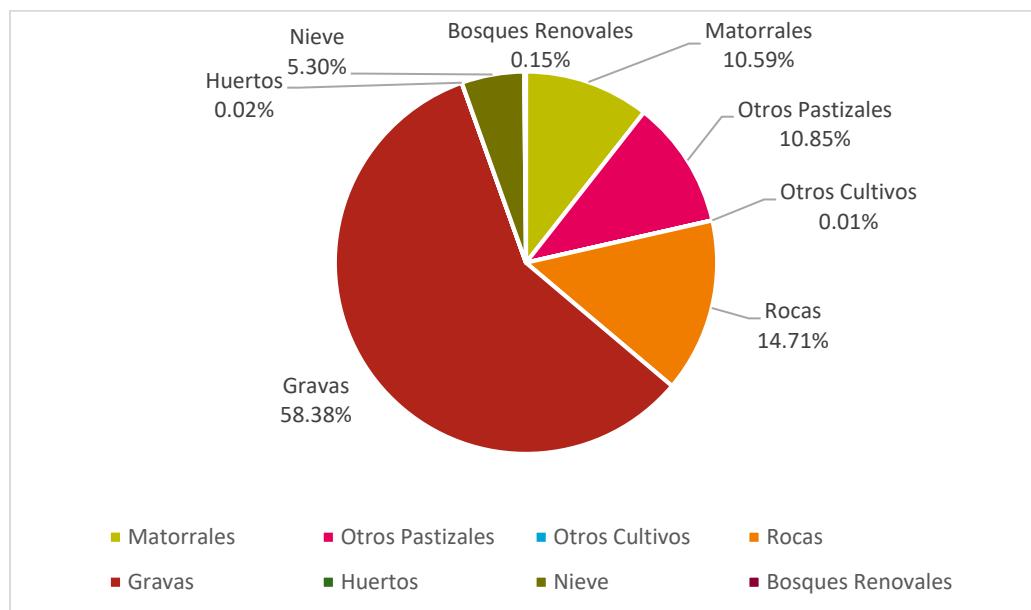


Figura 3-8: Porcentajes de cobertura de suelos. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-8: Denominación de usos de suelo. Fuente: Elaboración Propia

Código	Uso de Suelo	Denominación
931	Rocas	Uso 1
932	Gravas	Uso 2
410	Matorrales	Uso 3
320	Otros Pastizales	Uso 4
1010	Nieve	Uso 5
130	Otros Cultivos	Uso 6
212	Bosques Renovales	Uso 7
140	Huertos	Uso 8

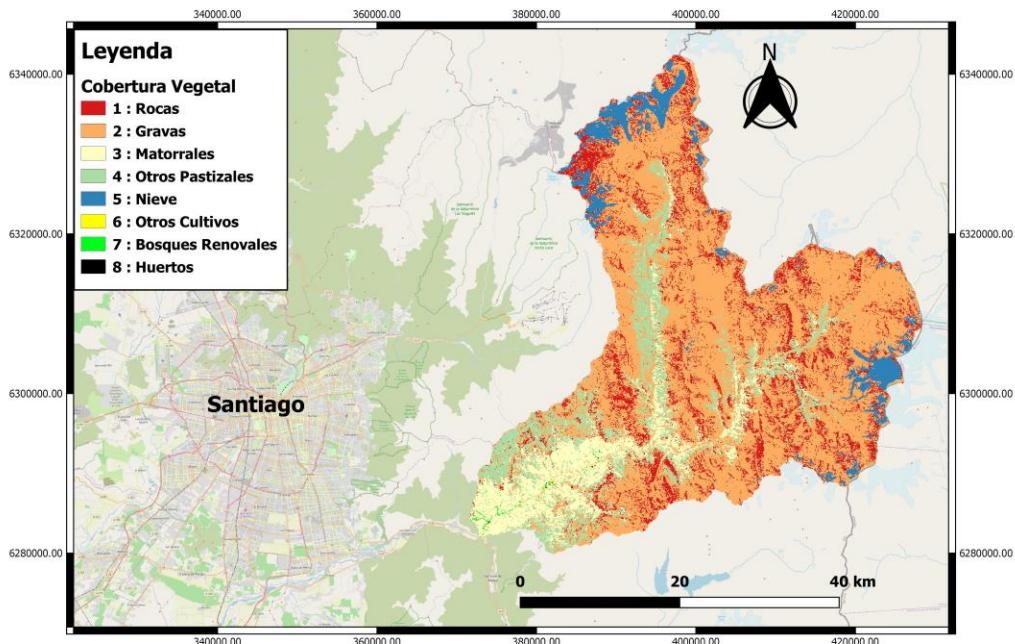


Figura 3-9: Cobertura de Suelos Cuenca "Río Colorado". Fuente: Elaboración propia

3.8 Información Meteorológica

En el presente estudio las series meteorológicas que se utilizan consisten en los productos grillados CR2MET de la nueva base de datos generadas por el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)². La fuente de información consta de una grilla rectangular de 0.05° latitud-longitud (aproximadamente 5km) para el territorio de Chile continental y para el período 1979-2018 (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013). A partir de la grilla, se considerarán los puntos que se ubiquen dentro del contorno de la cuenca del “Río Colorado”, resultando en un total de 64 puntos que proveen las variables de precipitación y temperaturas medias a escala diaria para el período de estudio 2008-2018. Esto se muestra de manera gráfica en la Figura 3-10.

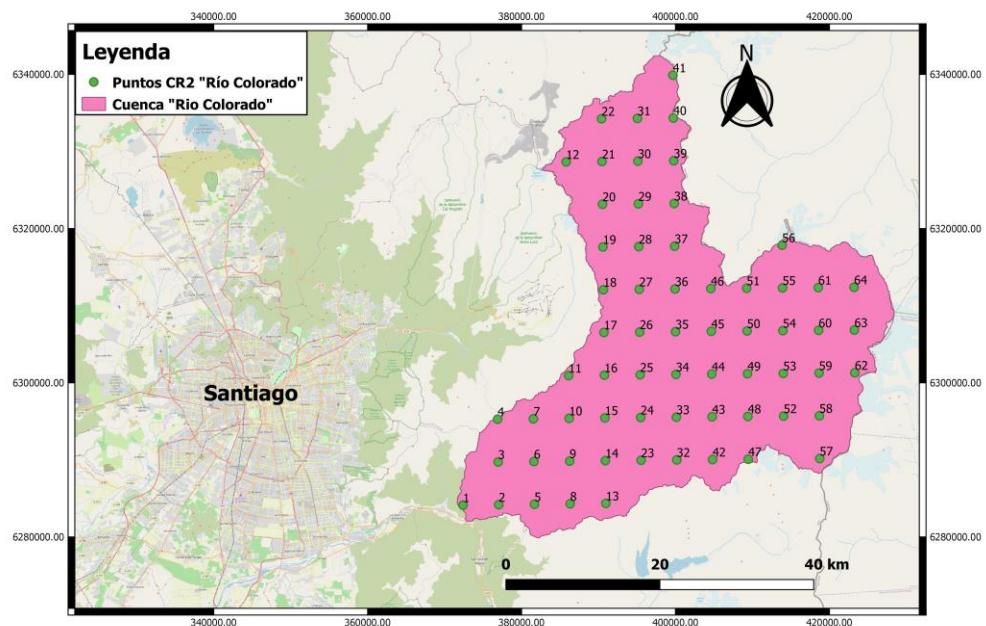


Figura 3-10: Mapa Grillado CR2 de zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

3.9 Información Fluviométrica

Las series de caudal utilizadas en el presente estudio provienen de la base de datos del explorador climático (CR)², que es una herramienta en línea que permite visualizar datos climáticos, desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)² e implementada por Meteodata (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013). La estación de referencia corresponde a “Río Colorado antes Río Maipo” (en adelante “Río Colorado”) ubicada a la salida de la cuenca de estudio (ver Figura 3-1). Además, se utiliza la información de la estación “Río Maipo en El Manzano” (en adelante “Río Maipo”) para analizar la validez de los datos de la estación de referencia y rellenar datos faltantes en esta. La información de las estaciones utilizadas se presenta en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9: Información estaciones fluviométricas. Fuente: Elaboración propia

ID	Estación	UTM X [m]	UTM Y [m]	Elevación [m.s.n.m]
1	Río Colorado	372847	6282122	908
2	Río Maipo	372019	6281633	887

3.10 Imágenes satelitales Snow Cover

Para incorporar como función objetivo en la etapa de calibración de la modelación hidrológica el ajuste según la cobertura de nieve (SCA), se dispuso la utilización de imágenes satelitales de la máxima extensión de cobertura de nieve reportada en un período de 8 días que informa el centro NSIDC DAAC de la NASA. Los mapas se encuentran en formato ráster con una resolución de 500 m x 500 m y son generados a partir de la observación del satélite MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid (Román et al., 2016). La descarga se realiza desde la página NSDIC (National Snow & Ice Data Center) (<https://nsidc.org/data/mod10a2>), que requiere de una previa geolocalización de la zona de interés. Es importante señalar que, para detectar las zonas cubiertas con nieve, se debe considerar la convención de valores que se detalla en la página previamente mencionada. La convención se muestra a continuación en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10: Convención de valores y descripción. Fuente: <https://nsidc.org/data/mod10a2>

Valor	Descripción
0	Sin datos
1	Indefinido
11	Noche
25	Sin Nieve
37	Lago
39	Océano
50	Nubes
100	Lago Congelado
200	Nieve
254	Detector Saturado
255	Relleno

4 METODOLOGÍA

En este capítulo se detallan los procedimientos para emplear TETIS en la modelación hidrológica de la cuenca del “Río Colorado”, y la posterior evaluación de la incertidumbre espacial de la precipitación con los parámetros de momento espacial. Esto contempla la obtención de la información de entrada (denominado Preproceso) del modelo hidrológico, en donde se incluye: tratamiento de mapas, recopilación de parámetros del modelo, y por último el tratamiento de series de caudales. Luego, se efectúa la modelación hidrológica para el período de Calibración-Validación. Por último, se procede con la etapa de evaluación de la incertidumbre espacial de la precipitación.

A continuación, se presentarán en primer lugar los aspectos generales sobre la modelación hidrológica con el software TETIS. En segundo lugar, se detallará el cálculo de cobertura de nieve SCA observada MODIS de la cuenca de estudio, que es empleada en las funciones objetivo de la etapa de calibración de la simulación hidrológica. En tercer lugar, se detallará la metodología propuesta para la etapa de Calibración-Validación, presentando los parámetros iniciales de modelación, funciones objetivo, y por último la metodología propuesta. En cuarto lugar, se describe la obtención de las distancias de flujo de la cuenca de estudio, que serán de utilidad para el cálculo de los parámetros de incertidumbre espacial. Por último, se presentan las ecuaciones y valores adoptados para la obtención de valores teóricos del HUS.

En la Figura 4-1 se muestra de manera gráfica la metodología de trabajo propuesta, en donde se muestran las etapas a desarrollar, y las actividades involucradas en cada una de ellas. La metodología consta de tres macro-actividades: Preproceso; Modelación Hidrológica con el Software TETIS; y por último la Evaluación de la Incertidumbre Espacial. Primero, la etapa de Preproceso consiste en la recopilación y tratamiento de la información de entrada. Segundo, la etapa de Modelación Hidrológica TETIS emplea los datos de entrada para efectuar la Calibración-Validación del modelo hidrológico, y además realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros. Finalmente, la Evaluación de la Incertidumbre Espacial de la Precipitación ocupa la información de entrada para calcular los parámetros de momento espaciales a escala diaria para la cuenca de estudio, terminando con un análisis de los resultados en el período de estudio.

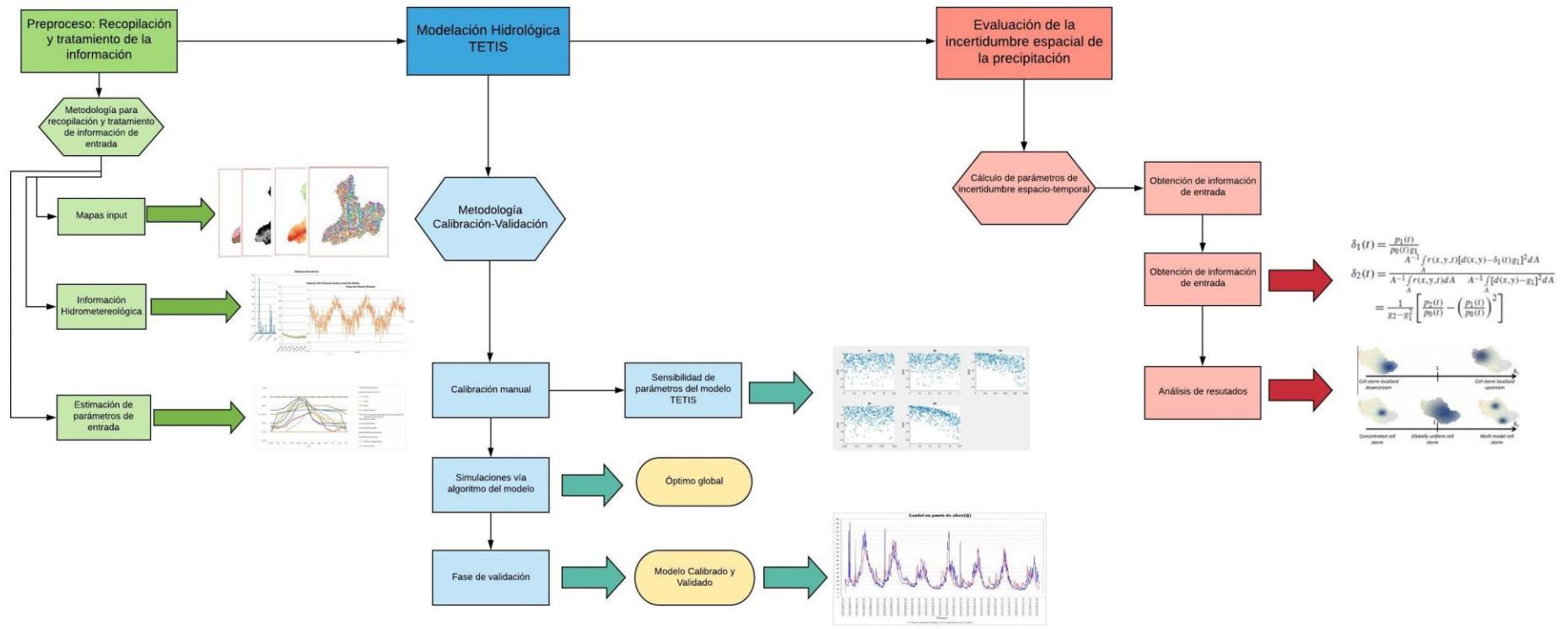


Figura 4-1: Esquema Metodológico. Fuente: Elaboración Propia

4.1 Preproceso: Recopilación y tratamiento de los mapas de entrada del modelo TETIS

En esta sección se desarrolla la obtención y tratamiento de la información de entrada del modelo hidrológico TETIS. Respecto de los datos de los mapas de entrada, el orden será de acuerdo a las fuentes de datos empleadas para obtener los productos finales, tal como se muestra en la Tabla 4-1, en donde además se señala el formato de la información de entrada y los mapas resultantes.

Tabla 4-1: Mapas, formato y escala y mapas obtenidos. Fuente: Elaboración propia

Mapas	Formato y Escala	Mapas Resultantes
Modelo de Elevación Digital (MED)	Ráster, Pixel 85x85	Mapa de pendientes Mapa de direcciones de flujo Mapa de celdas acumuladas Mapa de velocidad de flujo en ladera
Land Cover Chile 2014	Ráster, Pixel 30x30	Mapa de profundidad de raíces Mapa de cobertura vegetal Mapa de almacenamiento en charcos
SOTER based soil parameters estimates for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC)	ESRI Shapefile, Escala 1:5.000.000	Mapa de conductividades hidráulicas del suelo (Ks) horizontal y vertical Mapa contenido de agua de capa superficial de suelo (AWC TOP) Mapa de conductividad hidráulica del interflújo (Kss)
Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN)	ESRI Shapefile, Escala 1:1.000.000	Mapa de permeabilidad horizontal y vertical del acuífero (Kp) Mapa de conductividad hidráulica del acuífero (Ksa) Mapa de capacidad de pérdidas al acuífero profundo (Kps)
Multi-Origen	-	Mapa de almacenamiento estático (Hu)

4.1.1 Tratamiento de Mapas derivados del MED

Mapa de direcciones de flujo

Uno de los parámetros de entrada más importantes es el que define el movimiento del agua a través de las celdas, que se obtiene mediante el mapa de direcciones de flujo. El software TETIS ocupa el modelo de flujo de 8 direcciones (D8), cuya codificación de direcciones de flujo de ArcGIS considera las direcciones N, S, E y O como 64, 4, 1 y 16 respectivamente; mientras que las direcciones NO, NE, SO y SE adoptan valores de 32, 128, 8 y 2 respectivamente, tal como se observa en la Figura 4-2. En cambio, como se muestra en la Figura 4-3, la notación que entrega el software QGIS adopta valores para las direcciones N, S, E y O de 3, 7, 1 y 5, respectivamente; mientras que las direcciones NO, NE, SO y SE toman valores de 4, 2, 6 y 8. Por ende, es necesario primero usar las herramientas para generar el mapa en cuestión, y luego realizar el reemplazo de valores para lograr la convención aceptada por TETIS.

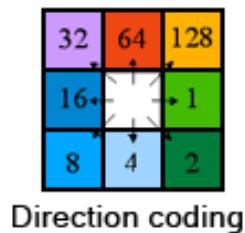


Figura 4-2 : Codificación de dirección de flujo D8 de ArcGIS. Fuente: Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>

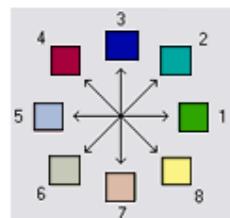


Figura 4-3: Codificación de dirección de flujo D8 de QGIS. Fuente: Obtenido de https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/taudem/basic_grid_analysis_tools.html

Mapa de celdas drenantes acumuladas

Este mapa juega un importante rol en la definición y la caracterización de cauces y la cuenca, sirviendo así de nexo de unión entre las direcciones de flujo y la consiguiente aplicación en la extracción de elementos y unidades hidrológicas (Ferrero, 2004). La interpretación se basa en que, a mayor área de drenaje tenga la celda de acuerdo a lo que entrega la topografía, mayor es la acumulación que presenta. Respecto de la obtención, cabe señalar que mediante la misma herramienta de QGIS es posible obtener el mapa de celdas drenantes acumuladas y el mapa de direcciones de flujo.

Mapa de pendientes S_0 [m/m] y derivados

La pendiente es parte de una de las características definitorias del relieve, y de parámetros de tal importancia como la velocidad de flujo del agua , el riesgo de erosión o la mayor o menor infiltración de agua en el suelo, entre muchas otras (Ferrero, 2004). Para determinar el presente mapa es necesario aplicar las herramientas que provee el software QGIS. Posteriormente, con el mapa de pendientes, es posible obtener el mapa de almacenamiento en pendiente $Alm_{pendiente}$ que será de utilidad para la elaboración del mapa de almacenamiento estático H_u en la sección 4.1.5. La expresión empírica para su determinación se muestra a continuación (Alva Pretel, 2017):

$$Alm_{pendiente} [mm] = 10 - 1.3 * S_0$$

Donde:

- > S_0 : Pendiente del terreno en [m/m]

Mapa de velocidad de ladera v [m/s]

En cuanto al mapa de velocidades, dicha variable se considera estacionaria y constante en toda la celda, y que a su vez varía según la pendiente S_0 . Por ende, para calcular el presente mapa se requiere tener previamente determinado el mapa de pendientes. Luego, mediante el uso de herramientas de QGIS se determina de acuerdo a la siguiente expresión (Ramírez, 2012):

$$v [m/s] = 1.414 * \sqrt{S_0}$$

Donde:

- > S_0 : Pendiente del terreno [m/m]

4.1.2 Tratamiento de Mapas derivados del Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN)

Mapa de capacidad de percolación K_p [mm/hr] y derivados

El tratamiento empleado para determinar el mapa de capacidad de percolación K_p considera las categorías de permeabilidad de acuerdo a los antecedentes presentados en la sección 3.4 y la sección 3.5; además de obviar las zonas sin información presentes; y por último igualar las categorías de diferentes unidades litológicas por simplicidad. En este contexto, para la definición de valores de capacidad de percolación se consideran las categorías de permeabilidad del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2020). Dicha leyenda, que se muestra en la Tabla 4-2, consta de cinco tipos de permeabilidad: muy alta (MA), alta (A), media (M), baja (B) y muy baja (MB); lo que se complementa con la unidad litológica para definir una categoría cualitativa de permeabilidad equivalente en la zona de estudio. Los valores asociados a cada categoría se recopilan de la bibliografía de apoyo y se muestran en la Tabla 4-3. Por último, los valores adoptados para el área de estudio se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-2: Leyenda del mapa Litoestratigráfico y de permeabilidades de España. Fuente: (IGME, 2020)

LITOLOGÍAS	PERMEABILIDAD	MUY ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA
CON AGUAS UTILIZABLES	FISURABLES SOLUBLES	C-MA	C-A	C-M	C-B	C-MB
	DETРИTICAS (Cuaternario)	Q-MA	Q-A	Q-M	Q-B	Q-MB
	DETРИTICAS	D-MA	D-A	D-M	D-B	D-MB
	VOLCANICAS (Piroclasticas y lavaicas)	V-MA	V-A	V-M	V-B	V-MB
	META-DETРИTICAS	M-MA	M-A	M-M	M-B	M-MB
	IGNEAS	I-MA	I-A	I-M	I-B	I-MB
CON AGUAS NO UTILIZABLES O DE MUY BAJA CALIDAD	POROSAS	E-MA	E-A	E-M	E-B	E-MB
	FISURABLES					
	POROSAS POR METEORIZACION					
	SOLUBLES					

Tabla 4-3: Valores de permeabilidad adoptados en función de la categoría cualitativa. Fuente: (Tejada Espinoza, 2016)

Categoría	Valor adoptado [mm/hr]
C-MB	4.17E-04
C-B	7.41E-02
C-M	13.18
C-A	2343.1
C-MA	416666.67
E-MB	4.17E-02
E-B	0.74
E-M	13.18
D-MB	4.17E-06
D-B	4.17E-04
D-M	4.17E-02
D-A	4.17
D-MA	416.67
M-MB	4.17E-07
M-B	2.34E-05
M-M	1.32E-03
Q-B	7.41E-03
Q-M	1.32
Q-A	234.31
Q-MA	41666.67
V-MB	0.36
V-B	1.14
I-MB	3.60E-07
I-B	3.60E-05

Tabla 4-4: Categorías asignadas a la cuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia

Unidad Litológica	Categoría de permeabilidad equivalente	Kp [mm/hr]
M3i Mioceno Inferior - Medio	V - B	1.14
JK1m Jurásico Superior - Cretacico Inferior	V - MB	0.36
Msg Mioceno Superior (13-7 Ma)	V - B	1.14
OM2c Oligoceno - Mioceno	V - B	1.14

El mapa de conductividad hidráulica del acuífero K_{sa} y el mapa de capacidad de pérdidas al acuífero profundo K_{ps} se determinan a partir del mapa de capacidad de percolación K_p . Para esto, mediante el uso de herramientas del software QGIS, se aplican las equivalencias que se muestran a continuación (Ramírez, 2012).

$$K_{sa}[\text{mm/hr}] = K_p$$

$$K_{ps}[\text{mm/hr}] = 0.1 * K_p$$

4.1.3 Tratamiento de Mapas derivados de base de datos SOTERLAC

Mapa de capacidad de infiltración $K_s[\text{mm/hr}]$ y derivados

La capacidad de infiltración usada en el modelo TETIS es la que tiene el suelo en estado saturado, y que también tiene la característica de ser estacionaria. Para la cuenca de estudio los valores adoptados se basan en las clases de suelo señalados en la sección 3.6. Luego, y a partir de la información que provee la base de datos del proyecto SOTERLAC (Batjes, 2005) se puede determinar el contenido de arena, arcilla y limo de los tipos de suelo definidos, y usando además bibliografía de apoyo (Te Chow et al., 1993), el valor de conductividad hidráulica saturada en [mm/hr] (ver Tabla 4-5). Por último, con el mapa K_s generado, se obtiene además el mapa de conductividad hidráulica del interflujo K_{ss} aplicando la siguiente relación de equivalencia (Ramírez, 2012):

$$K_{ss}[\text{mm/hr}] = K_s$$

Tabla 4-5: Valores de conductividad hidráulica Ks. Fuente: Elaboración Propia

Unidad de Suelo (FAO 90)	Arena [% masa]	Limo [% masa]	Arcilla [% masa]	Clase de suelo	Ks [mm/hr]
Cmu	48	33	19	Marga arenosa	20
Lpe	54	26	20	Arena margosa	6.5
Lpd	52	29	19	Arena margosa	20
CLp	47	22	31	Marga arcillosa	0.8

Mapa de contenido de agua de la capa superficial de suelo $AWC_{TOP} [mm/m]$

De acuerdo a las clases de suelo definidas en la sección 3.6 y la información que se puede recopilar de la base de datos del proyecto SOTERLAC (Batjes, 2005), se asignan los valores estándar de contenido de agua superficial de suelo para generar el mapa AWC_{TOP} en [mm/m] que se muestran en la Tabla 4-6. Este mapa será de utilidad para determinar el mapa de almacenamiento estático H_u en la sección 4.1.5.

Tabla 4-6: Valores de AWC TOP de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

Unidad de Suelo (FAO 90)	AWC TOP [mm/m]
Cmu	156
Lpe	146
Lpd	142
CLp	97

4.1.4 Tratamiento de Mapas derivados de Land Cover Chile

Mapa de Cobertura de Suelos y derivados

La generación del mapa de coberturas de suelo de la zona de estudio considera casi la totalidad de las coberturas presentadas en la sección 3.7, con la diferencia que reemplaza la cobertura de nieve por la de gravas usando herramientas del software QGIS, y de esta manera considerar la variabilidad estacional de la cobertura nival en la cuenca. Cabe mencionar que los sectores que no son parte de la cuenca, pero que están dentro del mapa, adoptan un valor de cobertura arbitrario, puesto que no afectan la etapa de modelación hidrológica. El mapa en cuestión considera por cada cobertura los números de orden señalados en la Tabla 3-8, pero que al omitir la cobertura de nieve, se traduce en que todas las posteriores al orden n°5 presentan una diferencia de un orden menor. Posteriormente, usando la bibliografía de apoyo para obtener valores estándar de profundidad de raíces y almacenamiento en charcos (Ramírez, 2012; Alva

Pretel, 2017) que se muestran en la Tabla 4-7, se obtienen los mapas de profundidad de raíces $Profráices[m]$ y el mapa de almacenamiento en charcos $Alm_{charcos}[mm]$ de la zona de estudio. Ambos mapas son necesarios para el cálculo del mapa de almacenamiento estático H_u tratado en la sección 4.1.5.

Tabla 4-7: Valores estándar de profundidad de raíces y de almacenamientos de charcos. Fuente: Elaboración propia

Uso	Profundidad de Raíces [m]	Almacenamiento en charcos [mm]
Uso 1	0.02	0
Uso 2	0.02	0
Uso 3	0.7	3
Uso 4	0.7	5
Uso 5	1.25	4
Uso 6	1	6
Uso 7	1.25	4

4.1.5 Tratamiento de Mapas Multi-Origen

Mapa de almacenamiento estático $H_u[mm]$

El mapa de almacenamiento estático $H_u[mm]$ es la cantidad de agua que se almacena tanto en la superficie como en la capa superficial del suelo hasta donde se alcanzan las raíces. Se obtiene de la superposición del mapa de almacenamiento superficial y el mapa de almacenamiento capilar del suelo. Esto se muestra en la ecuación descrita a continuación (Alva Pretel, 2017):

$$H_u[mm] = Alm_{sup} + AWC_{TOP} * \min(Profráices; ROO)$$

De la expresión anterior, el primer término consiste en el mapa de almacenamiento superficial, que se compone de dos mapas: el almacenamiento propio del relieve del terreno, $Alm_{pendiente}[mm]$; y el almacenamiento en charcos, $Alm_{charcos}[mm]$. Los procedimientos para determinar los almacenamientos en pendientes y charcos fueron definidos en las secciones 4.1.1 y 4.1.4, respectivamente. Finalmente, el mapa de almacenamiento superficial $Alm_{sup}[mm]$ se calcula con la siguiente expresión:

$$Alm_{sup}[mm] = Alm_{charcos} + Alm_{pendiente}$$

El segundo término para el cálculo del mapa de almacenamiento estático, correspondiente al almacenamiento capilar, que se determina a partir del producto del mapa $AWC_{TOP}[mm/m]$ y el mapa de profundidad de raíces $Prof_{raices}[m]$, y que representa la retención de agua por fuerzas capilares debido a la tensión superficial del suelo (Alva Pretel, 2017). Cabe señalar que la información de profundidad al primer obstáculo para el desarrollo de raíces ROO se desconoce para el área de estudio, por ende no se considera. Finalmente, con la superposición de ambos mapas resultantes se obtiene el mapa de almacenamiento estático $H_u[mm]$.

4.2 Preproceso: Recopilación de parámetros del modelo TETIS

En esta sección se presenta la información de parámetros y factores de evapotranspiración requeridos para la simulación hidrológica con el software TETIS. En primera instancia se muestran los valores adoptados para los parámetros geomorfológicos necesarios y luego se muestran los valores considerados de factores de evapotranspiración a nivel mensual.

4.2.1 Parámetros geomorfológicos

Uno de los parámetros de entrada para la etapa de modelación en TETIS consiste en los parámetros geomorfológicos de la cuenca. Esto permite diferenciar tres elementos de la cuenca: ladera, cárcavas y cauces, lo que se define en función de áreas umbrales. Para este caso se usa un valor umbral del interflujo de 0.01 km^2 y un valor umbral para el flujo base de 15.35 km^2 . Por otro lado, se definen los valores recomendados por el manual de usuario de TETIS (GIMHA, 2020) para los parámetros geomorfológicos que se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Valores adoptados de parámetros geomorfológicos de la cuenca de estudio. Fuente: (GIMHA, 2020)

Relación		Coeficiente		Exponente
$Q_b \text{ vs } \Lambda$	k	0.6	Φ	0.75
$w_b \text{ vs } Q_b$	c_1	3.26	ε_1	0.5
$w \text{ vs } Q$			ε_2	0.2
$d \text{ vs } y * s_0$	c_d	20	θ	1.25
$n \text{ vs } d$	c_n	0.047	ξ	0.1667

4.2.2 Valores mensuales del factor de vegetación

La evapotranspiración depende de factores como: el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo. De acuerdo con la metodología mencionada en el documento 56 de la FAO (Allen et al., 2006), es necesario calcular una evapotranspiración de un cultivo de referencia y multiplicarla por un coeficiente de cultivo para obtener la evaporación de cultivo como se muestra a continuación:

$$ET_c = K_c * ET_0$$

Donde:

- > ET_c : Evaporación del cultivo [mm d⁻¹]
- > K_c : Coeficiente del cultivo [adimensional]
- > ET_0 : Evaporación del cultivo de referencia [mm d⁻¹]

La evaporación de cultivo de referencia representa la demanda climática de la zona, mientras que el valor de K_c varía principalmente en función de los usos de suelo. Para la zona de estudio los valores se basan en lo sugerido por el manual del software TETIS (GIMHA, 2020), que se muestran en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Valores asignados de Kc para la cuenca de estudio. Fuente: (Múnera & Francés, 2008)

Mes	Kc						
	Uso 1	Uso 2	Uso 3	Uso 4	Uso 5	Uso 6	Uso 7
Enero	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Febrero	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Marzo	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Abril	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Mayo	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Junio	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Julio	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Agosto	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Septiembre	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Octubre	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Noviembre	0.2	0.2	1	1	1	1	1
Diciembre	0.2	0.2	1	1	1	1	1

4.3 Preproceso: Tratamiento de series de caudal medio diario

En esta sección se desarrollan los aspectos metodológicos de las series fluviométricas. Para esto, primero se presentan los datos fluviométricos de la estación del punto de salida de la cuenca en estudio, en conjunto con un análisis de datos extremos. Luego, se presenta la información relativa al relleno estadístico a partir de una estación fluviométrica vecina, en conjunto con los métodos de interpolación empleados para dicho propósito.

4.3.1 Datos de Caudal

Río Colorado

Los datos de caudal medio diario considerados para la modelación hidrológica corresponden a los de la estación fluviométrica “Río Colorado” que se ubica en el punto de salida de la cuenca de estudio (ver Figura 4-4). La información se encuentra completa en un 91.8% en el período de interés (faltan 330 datos de 4018 datos totales), que se debe a la falta de información considerable en los años 2009-2010; en los meses de enero del 2011 y septiembre del 2013; y por último un par de días de junio del 2014. El gráfico evidencia un régimen hídrico mixto con caudales elevados en los meses de verano producto del deshielo propio de una cuenca de montaña.

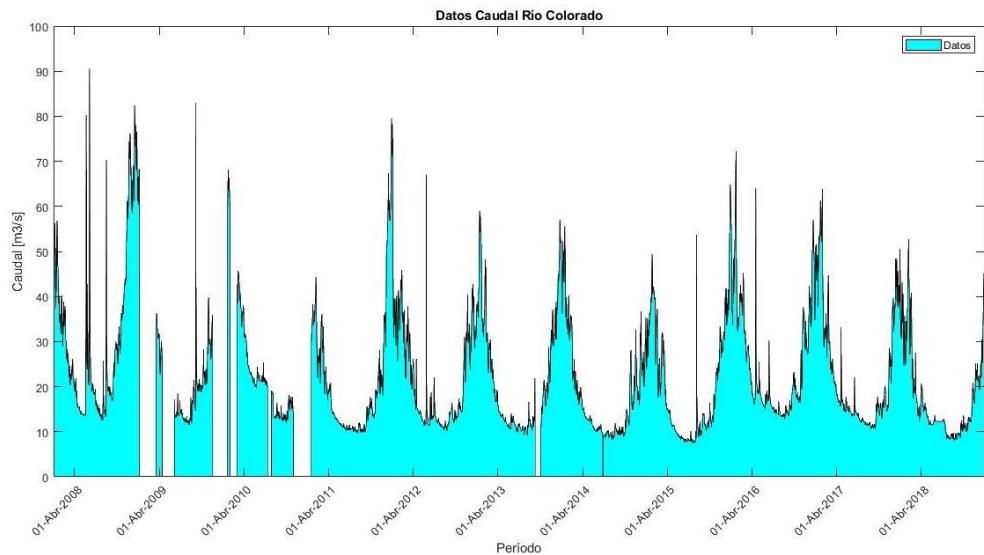


Figura 4-4: Datos de Caudal "Río Colorado". Fuente: (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013)

Los principales indicadores estadísticos de la estación Río Colorado se muestran en la Tabla 4-10. Utilizando esta información se elaboró un diagrama tipo BoxPlot para detectar datos extremos que requieran revisión (ver Figura 4-5). Se observan los percentiles 25%, 50% y 75%, y los ‘bigotes’ indican los percentiles 1% y 99%. Del diagrama se desprende que 37 datos tienen un valor superior al percentil 99%, de donde se observa que hay valores que se alejan considerablemente del umbral del percentil 99%, los cuales son detectados (ver Figura 4-6) y serán examinados posteriormente.

Tabla 4-10: Indicadores estadísticos principales - Estación Río Colorado.

Variable	Valor [m³/s]	Variable	Valor [m³/s]
Media	22.35	Percentil 25%	12.6
Desviación Estándar	13.31	Percentil 50%	17.5
Mínimo	7.5	Percentil 75%	29.2
Máximo	90.5	Percentil 99%	68.26
Rango	83	Rango IQR	16.6

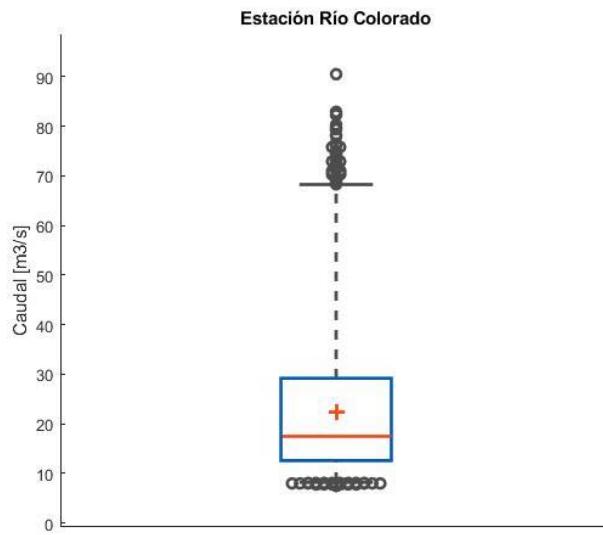


Figura 4-5: Diagrama Boxplot de Caudal Medio Diario - Estación Río Colorado. El diagrama BoxPlot incluye la media (representado por el símbolo '+'), la mediana (representado por la línea horizontal central), el percentil 25% (representado por el borde inferior de la caja) y el percentil 75% (representado por el borde superior de la caja). Los bigotes superior e inferior indican los percentiles 99% y 1%, respectivamente.

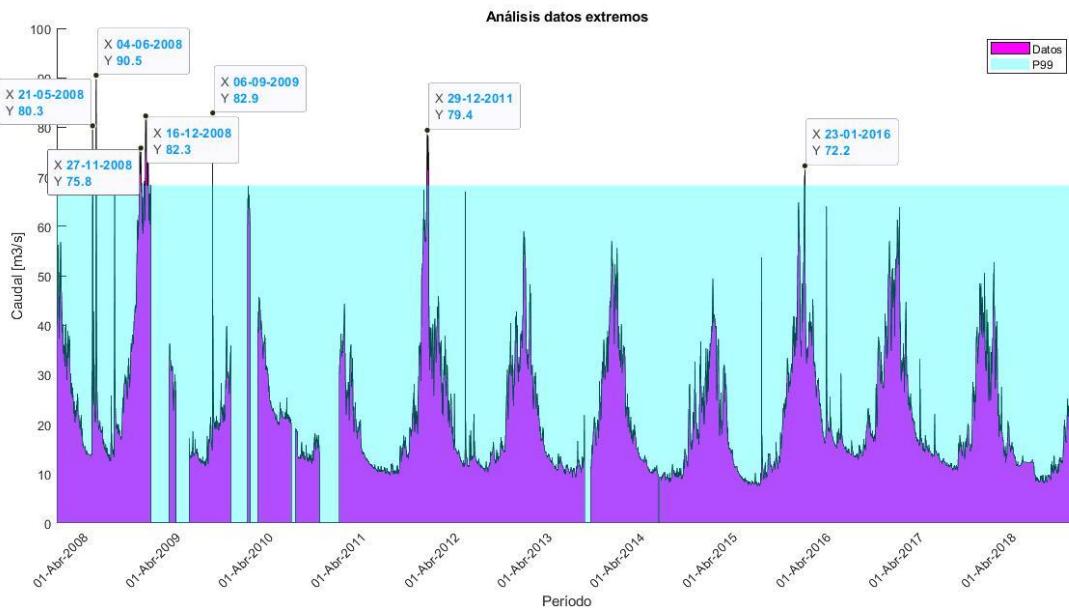


Figura 4-6: Comparación de datos de caudal con P99% - est Río Colorado.

Tabla 4-11: Datos extremos - est Río Colorado

Dato extremo n°	Fecha
1	21-05-2008
2	04-06-2008
3	27-11-2008
4	16-12-2008
5	06-09-2009
6	29-12-2011
7	23-01-2016

De la Figura 4-6 se observa que existen 7 datos extremos (cuyas fechas se muestran en la Tabla 4-11) que exceden considerablemente el percentil 99%. Se analizarán comparando con la estación fluviométrica “Río Maipo”, además de los puntos n°1 y n°2 de los productos grillados CR2MET (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013) que proveen la información pluviométrica más cercana. En la Figura 4-7 se muestra la ubicación de las estaciones fluviométricas y los puntos CR2MET señalados.

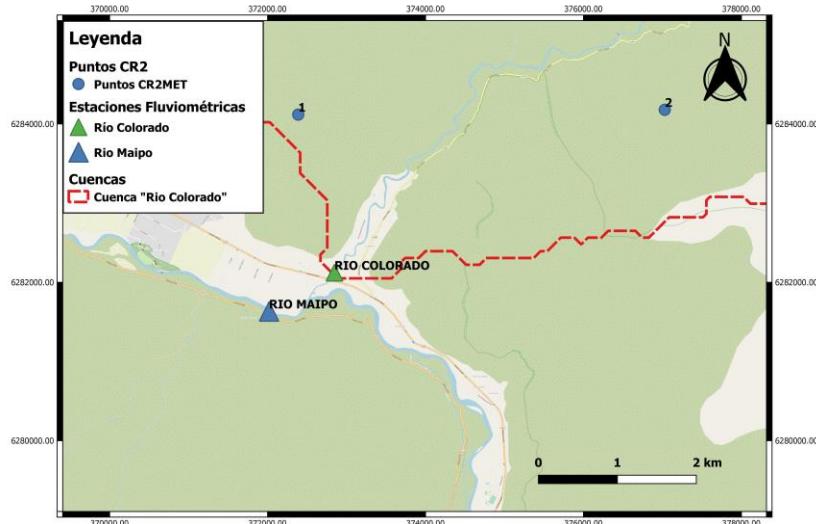


Figura 4-7: Ubicación de estaciones fluviométricas y puntos CR2.

Río Maipo

Los datos de caudal medio diario de la estación “Río Maipo” y la comparación con el percentil 99%, cuyo valor es de 284.04 m³/s, se muestran en la Figura 4-8. En este caso la información se encuentra disponible en un 93.28% para el período de interés. Se elaboró un diagrama tipo Boxplot que contiene el percentil 99% (ver Figura 4-9), representado como el bigote superior. Cabe señalar que los datos extremos que se observan son coincidentes con los eventos presentados en la estación “Río Colorado”.

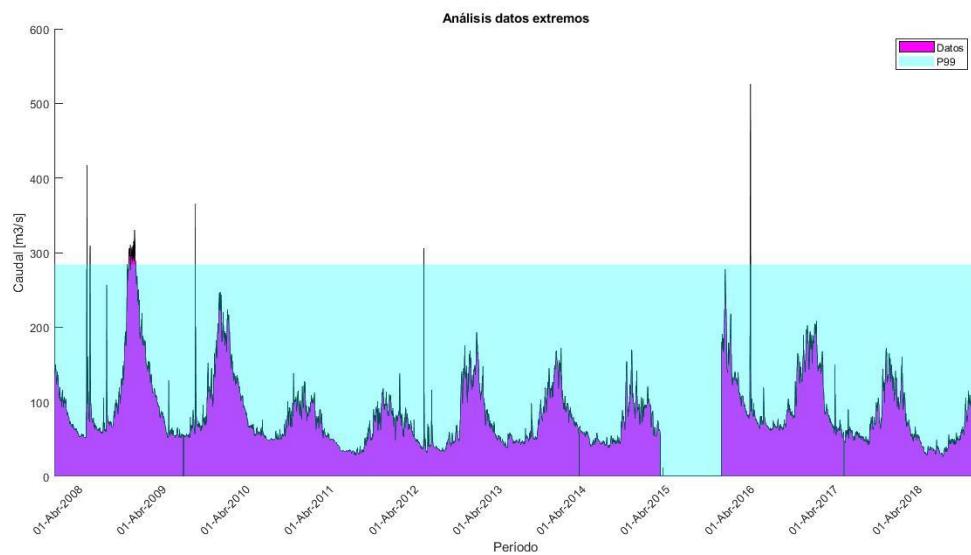


Figura 4-8: Datos de Caudal “Río Maipo”. Fuente: (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2, 2013)

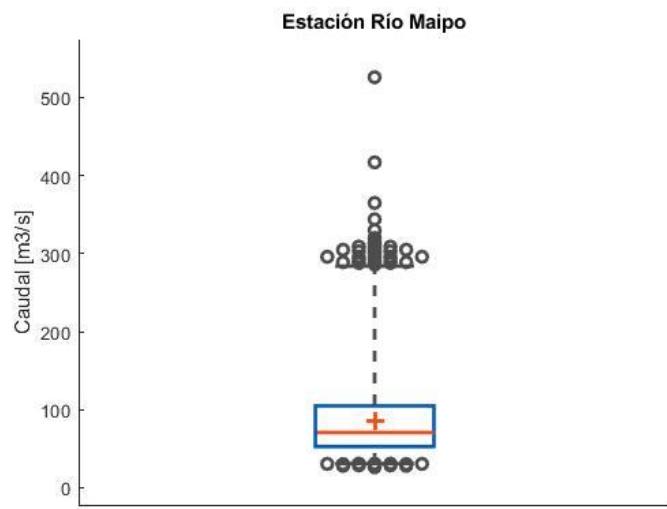


Figura 4-9: Diagrama Boxplot de Caudal Medio Diario – Estación Río Maipo

A continuación se muestra la revisión de los datos extremos de la estación “Río Colorado” detectados en la Figura 4-6, realizando para esto un análisis de precipitación-escorrentía: esto considera la estación “Río Maipo” y la información pluviométrica de los puntos CR2MET ya presentados en la Figura 4-7. El análisis contempla la revisión de todos datos extremos detectados, pero se tratarán solamente los eventos marcados en amarillo en la Tabla 4-11. Todos los eventos extremos restantes también son considerados válidos y se pueden consultar en el Anexo I.

Mes de Mayo-2008

En la Figura 4-10 se muestra de forma gráfica la información fluviométrica y pluviométrica de los 15 días previos y los 5 días posteriores al dato extremo del Río Colorado (80.3 m³/s registrado el 21 de mayo del 2008). De la gráfica se observa un alza de caudal tanto en la estación Río Colorado y Río Maipo producto de los eventos de precipitación durante los días 18 de mayo al 23 de mayo del 2008, cuyo peak de caudal registrado en la estación Río Maipo el día 23 de mayo supera el percentil 99%. Por ende, se considera válido el dato de la estación Río Colorado. La información fluviométrica y pluviométrica se puede consultar de manera cuantitativa en el Anexo I.

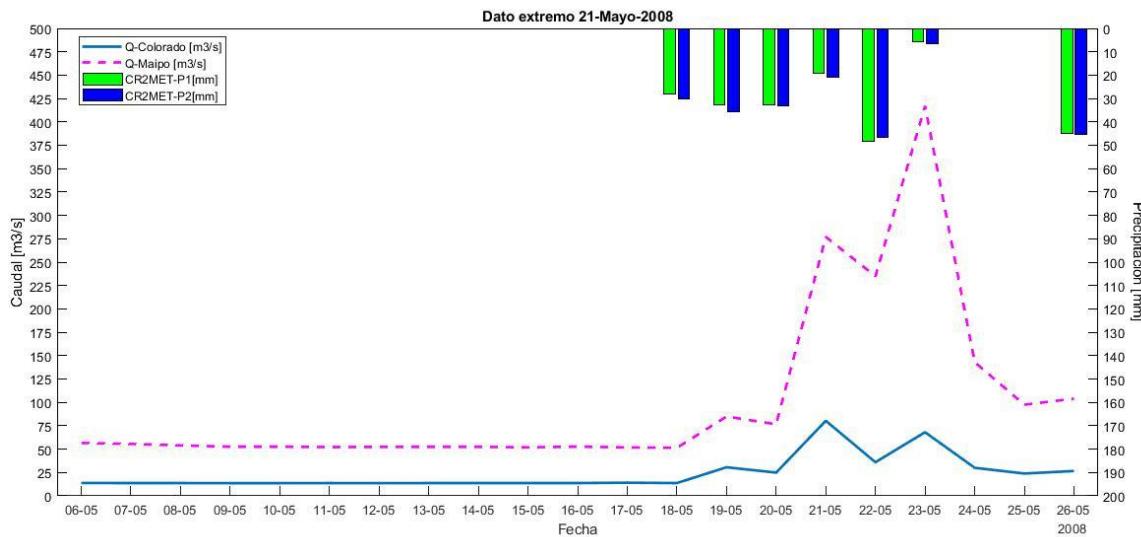


Figura 4-10: Comparación datos fluviométricos y pluviométricos - Mayo 2008

Mes de Junio-2008

En la Figura 4-11 se muestra la gráfica de caudal y precipitación de las estaciones ya señaladas, considerando una ventana de tiempo de los 15 días previos y 5 días posteriores al dato extremo detectado en la estación Río Colorado (90.5 m³/s registrado el día 4 de junio del año 2008). Se observa un alza de caudal en la estación Río Maipo considerable los días 4 y 5 de junio, y que a su vez también se refleja en la estación Río Colorado, que responden a las precipitaciones registradas el 3 y 4 de junio del 2008. Por consiguiente, se considera válido el dato extremo del día mencionado. La información fluviométrica y pluviométrica se puede consultar de manera cuantitativa en el Anexo I.

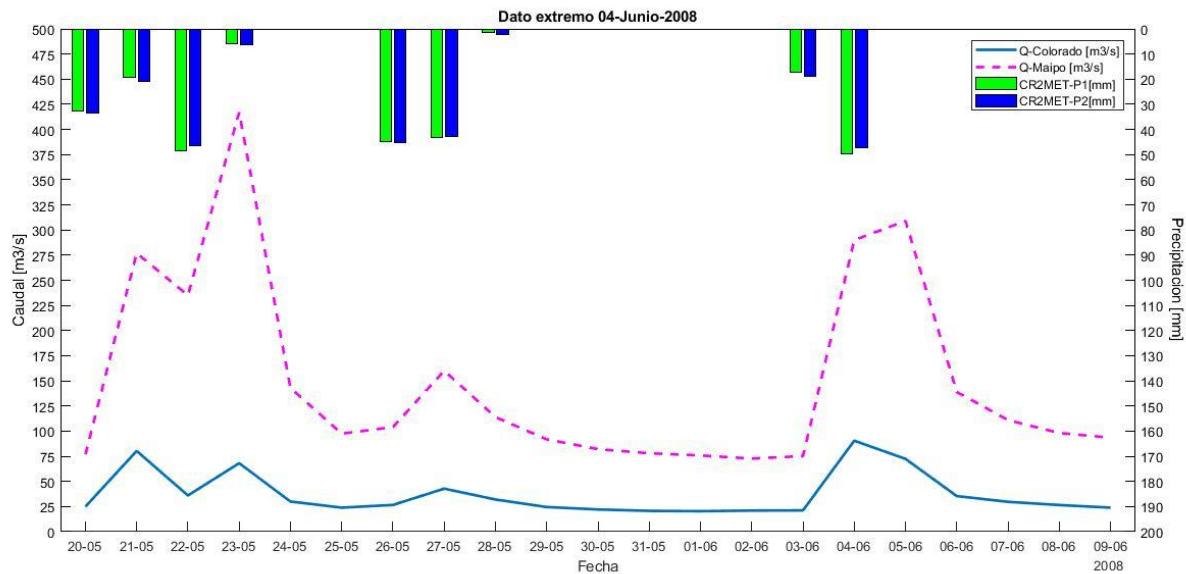


Figura 4-11: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Junio 2008

Mes de Septiembre-2009

En la Figura 4-12 se muestra la gráfica de caudal y precipitación referente al peak de caudal ocurrido el día 6 de septiembre del año 2009 con un valor de 83 m³/s, considerando los 15 días previos y los 5 días posteriores. Dicho peak también se puede observar en la estación Río Maipo, que registra un valor de 365 m³/s, cuyo valor es mayor al percentil 99%. Esto permite afirmar que el dato extremo ocurrido en la estación Río Colorado es válido. La información fluviométrica y pluviométrica se puede consultar de manera cuantitativa en el Anexo I.

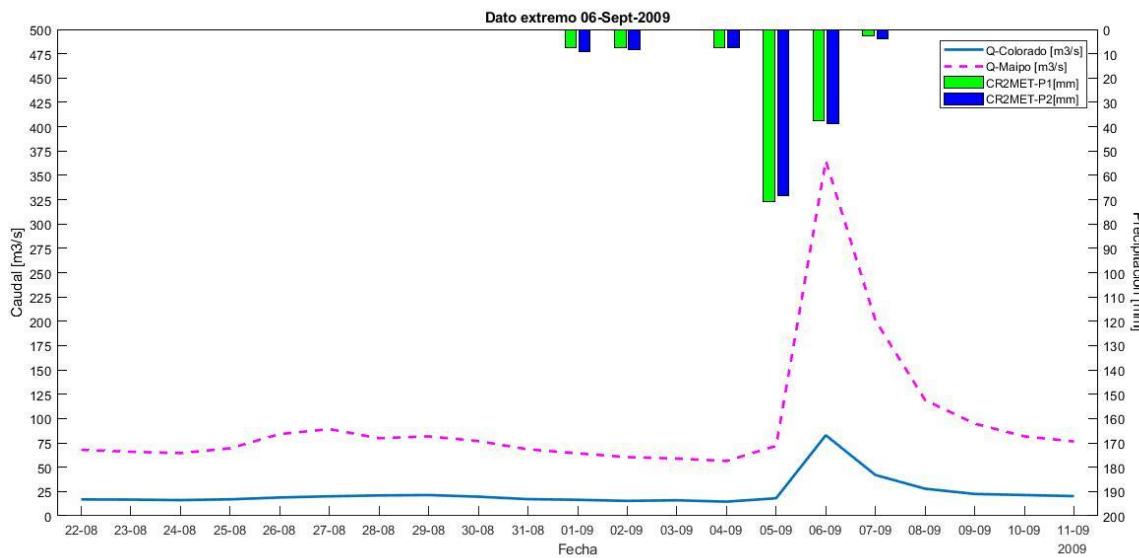


Figura 4-12: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Septiembre 2009

4.3.2 Relleno de datos de Caudal

Los datos de caudal medio diario de la estación objetivo “Río Colorado” fueron rellenados usando la información de la cuenca “Alto Maipo” y la estación de referencia en su punto de salida: “Río Maipo”, como se muestra en la Figura 4-13. Cabe señalar que la cuenca de estudio corresponde a una subcuenca de “Alto Maipo”, además de la cercanía que tienen la estación objetivo “Río Colorado” y la estación de referencia ubicada aguas abajo “Río Maipo”, que se distancian por 1127 m aproximadamente (ver Figura 4-7). Las características topográficas de la cuenca “Alto Maipo” se muestran en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12: Características topográficas de cuenca “Alto Maipo”. Fuente: Elaboración propia

Área (km ²)	Elevación minima [m]	Elevación maxima [m]	Elevación Media [m]	Pendiente Media [%]
4861.05	880	6547	3192.4	51.26

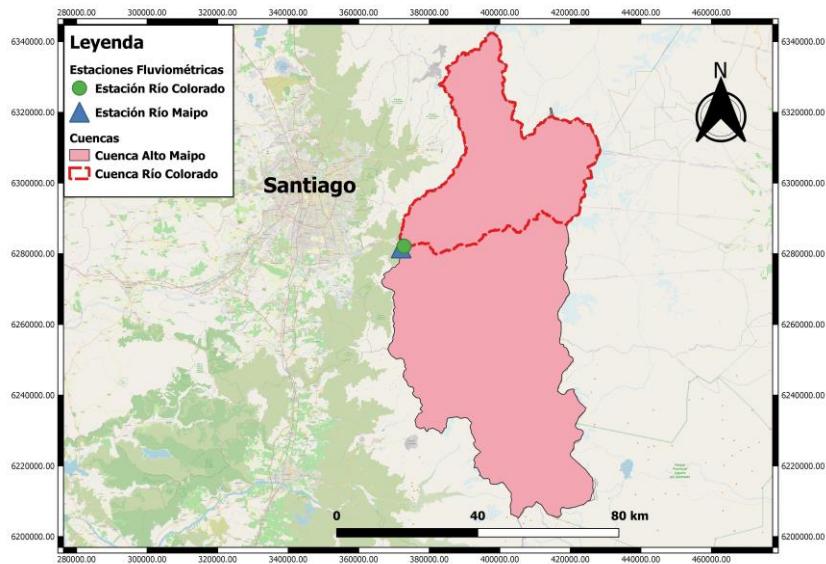


Figura 4-13: Ubicación cuencas y estaciones fluviométricas. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-14 se observan los datos de caudal medio diario de las estaciones fluviométricas Río Colorado y Río Maipo, de donde se evidencia una buena correlación entre ellas, y que el caudal Río Maipo presenta valores mayores. Esto se debe al mayor tamaño de la cuenca “Alto Maipo”, cuya subcuenca corresponde a la cuenca de estudio (cuenca del Río Colorado). Adicionalmente, a partir de los datos disponibles en ambas estaciones, se construye un gráfico de dispersión (ver Figura 4-15) y una tabla que informa las variables estadísticas principales (ver Tabla 4-13). El gráfico tiene como el eje de las abscisas a la estación Río Colorado (estación a rellenar) y el eje de las ordenadas a la estación Río Maipo. La información permite encontrar un buen nivel de correlación lineal de Pearson ($R = 0.88$), junto con un valor p igual a 0 (menor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$), que indica que la correlación entre las variables es significativa. Dicho esto, las variables serán utilizadas para la etapa de relleno estadístico.

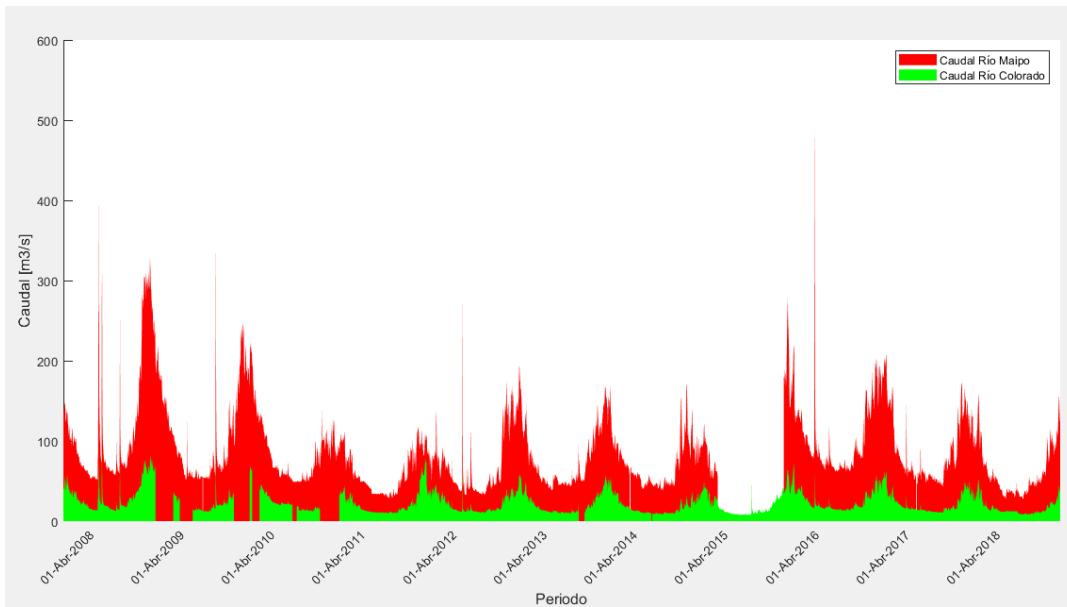


Figura 4-14: Datos de Caudal: Río Colorado y Río Maipo. Fuente: Elaboración Propia

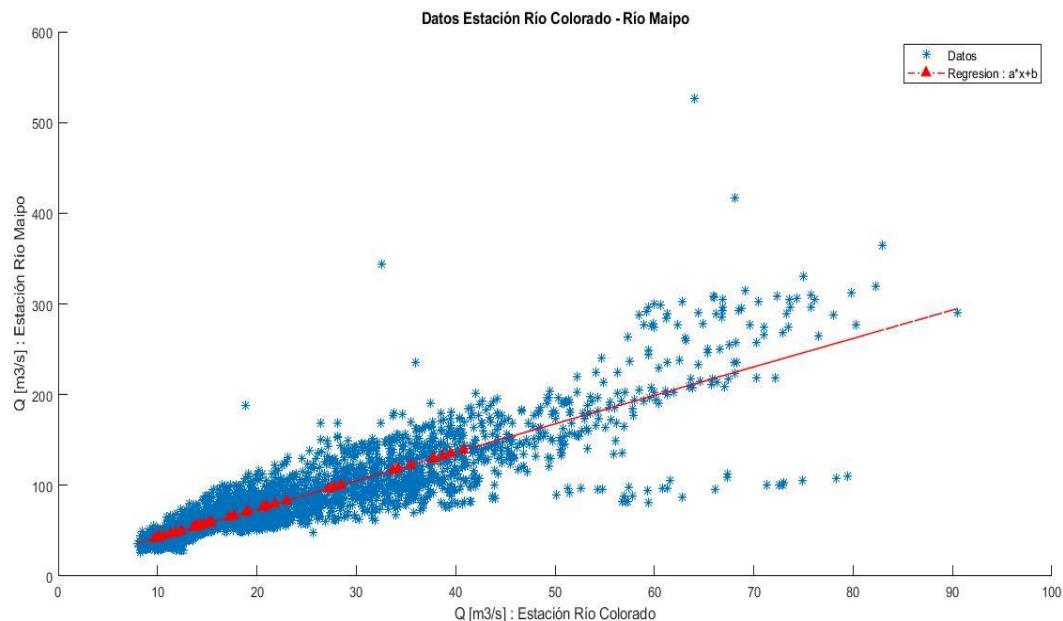


Figura 4-15: Gráfico de dispersión – Caudal Río Colorado (x) y estación Río Maipo (y)

Tabla 4-13: Variables estadísticas de est. Río Colorado (x) y est Río Maipo (y)

Variable estadística	Símbolo	Unidad	Valor
Correlación lineal Pearson	R	[-]	0.88
Coeficiente de determinación	R^2	[-]	0.78

Variable estadística	Símbolo	Unidad	Valor
Valor p	p	[-]	0
Varianza variable x	σ_x^2	[m ³ /s] ²	180.84
Varianza variable y	σ_y^2	[m ³ /s] ²	2281.03
Co-varianza	σ_{xy}	[m ³ /s] ²	567.04
Promedio variable x	\bar{X}	[m ³ /s]	22.98
Promedio variable y	\bar{Y}	[m ³ /s]	83.14

Para llenar la estadística faltante se revisaron los siguientes tres métodos de interpolación: Transposición de Caudales Medios, Método de Regresión Lineal y Método de Correlación Ortogonal. Luego, con los resultados estimados según los tres métodos de interpolación, se realiza una comparación con los datos observados usando para esto la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Absoluto Medio (EAM), de acuerdo a las ecuaciones que se muestran a continuación (Bennett et al., 2013):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}$$

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$

Donde:

- > y_i : Valor estimado
- > x_i : Valor observado
- > n : Número de datos

Transposición de Caudales Medios

Los datos de caudal se llenan usando los datos fluviométricos y de área de la cuenca adyacente según la siguiente relación de tres simples (Stowhas, 2016):

$$\frac{A_1}{Q_1} = \frac{A_2}{Q_2}$$

Donde:

- > A_1 : Área de la cuenca 1 (Río Colorado)
- > A_2 : Área de la cuenca 2 (Alto Maipo)
- > Q_1 : Caudal por llenar en la cuenca 1 (Río Colorado)
- > Q_2 : Caudal observado en la cuenca 1 (Río Maipo)

Método de Regresión Lineal

Los datos faltantes se rellenan considerando una relación lineal de las variables como se muestra a continuación:

$$y = a + b \cdot x$$

Donde la variable “y” se refiere al dato a llenar (Río Colorado) y la variable “x” al dato observado en la cuenca adyacente (Río Maipo). Los parámetros “a” y “b” de la relación anterior se determinan en función de las variables, según las siguientes relaciones:

$$a = \bar{y} - \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} \cdot \bar{x}$$

$$b = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}$$

Donde:

- > \bar{x}, \bar{y} : Promedio de la variable x e y, respectivamente
- > σ_x^2 : Varianza de la variable x
- > σ_{xy} : Covarianza de las variables x e y

Método de Correlación Ortogonal

La correlación ortogonal se basa en la siguiente ecuación cuadrática:

$$\lambda - (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \cdot \lambda + (\sigma_x^2 \sigma_y^2 - \sigma_{xy}^2) = 0 ; \text{ con } \lambda_1 > \lambda_2 > 0$$

Donde:

- > σ_x, σ_y : Desviación estándar variable x e y, respectivamente
- > σ_x^2, σ_y^2 : Varianza variable x e y, respectivamente
- > σ_{xy} : Covarianza de las variables x e y

Para llenar los datos faltantes se considera una relación lineal de la forma:

$$y = a + b \cdot x$$

Donde la variable “y” representa el dato a llenar (Río Colorado) y la variable “x” corresponde al dato observado en la cuenca adyacente (Alto Maipo). Los parámetros a y b de la expresión anterior son calculados en función de los pares de datos de ambas variables, de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$a = \bar{y} - m \cdot \bar{x}$$

$$b = m$$

Donde \bar{x} e \bar{y} corresponden al promedio de las variables x e y, respectivamente, y la variable “m” se determina según:

$$m = \frac{\sigma_{xy}}{\lambda_1 - \sigma_y^2}$$

Donde:

- > λ_1 : Raíz mayor de la ecuación cuadrática

4.4 Modelo Hidrológico

La modelación hidrológica de la cuenca del Río Colorado para el período 2008-2018 con el software TETIS considera como información de entrada toda la información tratada en la etapa de preproceso en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3. La delimitación de la cuenca y la determinación de los cauces se entrega de forma implícita mediante los mapas de entrada requeridos, lo que permite que el software pueda definir la cuenca hidrográfica en estudio automáticamente. A modo de ejemplo en la Figura 4-16 se muestra a la izquierda el mapa MED tratado desde el software QGIS y a la derecha su visualización desde el software TETIS.

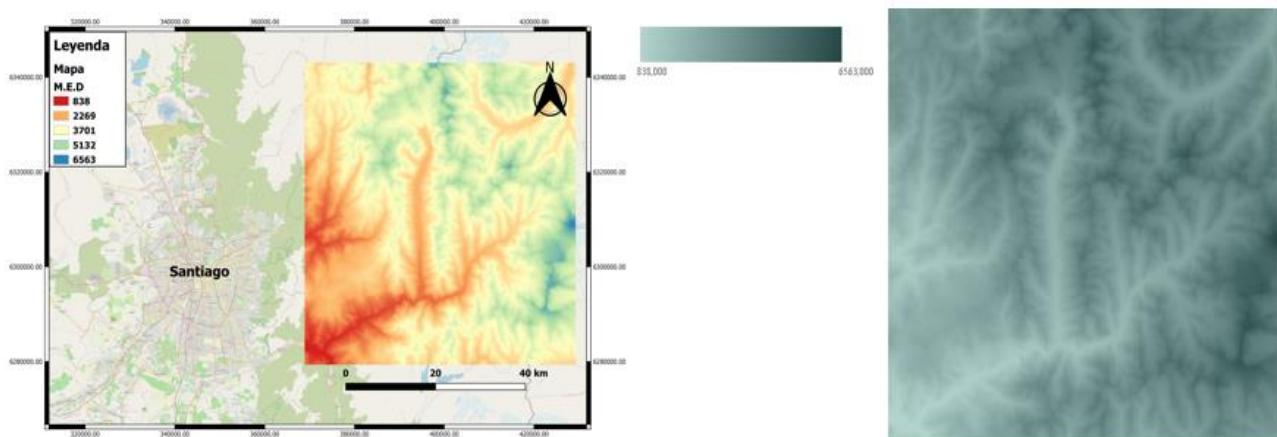


Figura 4-16: Mapas MED empleados en modelo hidrológico

4.5 Obtención de SCA observados

Las series de datos de SCA (del inglés *Snow Cover Area*) representan la relación de área cubierta de nieve con respecto al área total de la cuenca. Para su determinación se recurre a las imágenes señaladas en 3.10, y mediante el uso del software RStudio® para el lenguaje de programación R, se iteró abriendo cada mapa satelital y calculando el índice SCA. Dicho índice se obtiene contabilizando el total de pixeles que tengan un valor igual a 200 (tal como se señala Tabla 3-10), lo que posteriormente permite calcular el área total cubierta de nieve. Como resultado en la Figura 4-17 se muestra las series de datos de SCA observados

para la cuenca del Río Colorado que será de utilidad en las funciones objetivo para la etapa de calibración del modelo hidrológico.

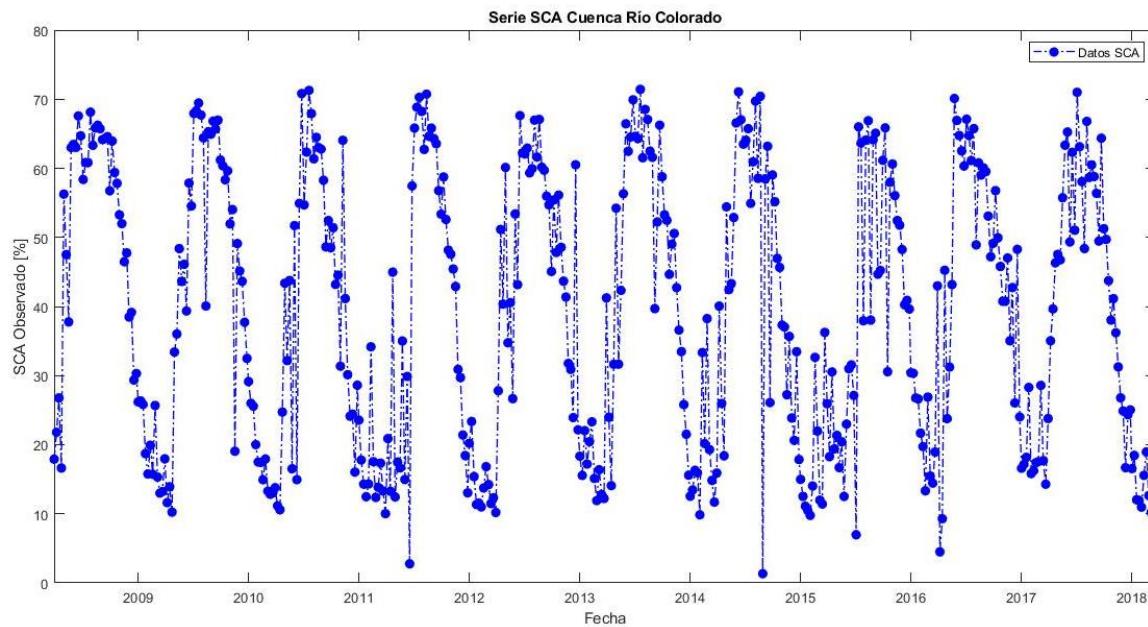


Figura 4-17: Series de SCA Observados con MODIS de la cuenca del Río Colorado.

4.6 Metodología Calibración-Validación

En esta sección se presenta la información relativa a la metodología de Calibración-Validación empleada. En primer lugar, se presentan los parámetros de modelación con los valores iniciales empleados, y que se ordenan de acuerdo a los grupos de parámetros del modelo. Después, se presentan las funciones objetivo consideradas para la evaluación de la eficiencia del modelo hidrológico. Por último, se detallará la metodología propuesta de Calibración-Validación para obtener un óptimo global de los parámetros del modelo.

4.6.1 Parámetros de modelación – Valores iniciales

Los parámetros del modelo TETIS empleados para la etapa de Calibración-Validación (tratados en la sección 2.2.4 y 2.2.5) se dividen en tres grupos de parámetros: factores correctores del modelo, tanques de estado inicial del modelo hidrológico, y por último parámetros de fusión de nieve. Además, existen tres parámetros adicionales en el modelo hidrológico que no serán modificados, adoptando los valores por defecto. Cabe señalar que el parámetro FC_0 sólo se puede variar manualmente, por ende será modificado solamente en la etapa de calibración manual. Los valores iniciales, y a partir de los cuales se comienza el proceso de calibración, se muestran a continuación en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14: Valores iniciales parámetros de modelación

Valores iniciales parámetros					
Factor Corrector	Valor	Tanque Estado Inicial	Valor	Parámetros de fusión	Valor
FC_0	1.0	H_1	0.0	M_f	1.0
FC_1	1.0	H_2	0.0	M_f^*	1.0
FC_2	1.0	H_3	0.0	T_b	1.0
FC_3	0.2	H_4	0.0		
FC_4	1.0	H_5	0.0		
FC_5	0.4	H_6	0.0		
FC_6	10.0				
FC_7	1.0				
FC_8	200.0				
FC_9	1.0				

4.6.2 Funciones objetivo (FO)

Para la etapa de calibración de los resultados se emplearán las funciones objetivo: *Nash-Sutcliffe* y *Kling-Gupta*, que comparan los caudales medios diarios observados y simulados; y además se emplea *Nash-Sutcliffe* para los valores de SCA observados y simulados (ver esquema de la Figura 4-18). Los valores en cuestión son calculados manualmente para cada simulación hidrológica, puesto que, de las funciones objetivo señaladas, el software TETIS solamente calcula el índice de *NSE* para caudales en forma automática (*Nash-Sutcliffe*).

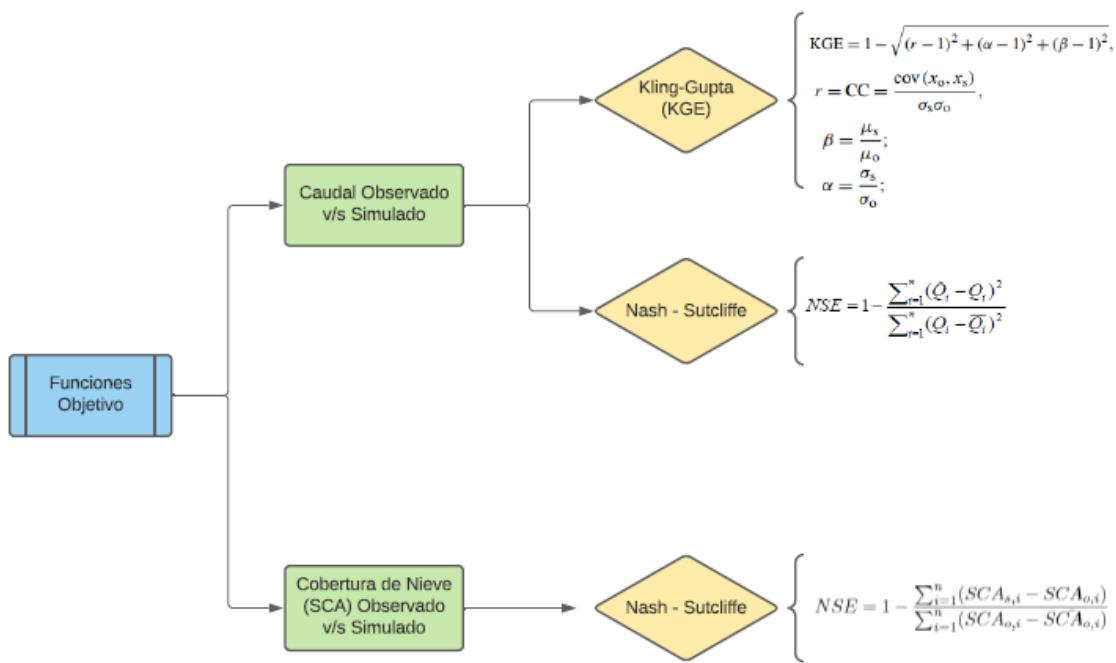


Figura 4-18: Funciones objetivo (FO) empleadas para el proceso de calibración de parámetros

4.6.3 Metodología propuesta

La metodología de Calibración-Validación (para los períodos 2008-2015 y 2015-2018, respectivamente) contempla una secuencia de cuatro etapas, que se proponen con el objeto de ajustar los parámetros a un valor óptimo global, de acuerdo a las funciones objetivo (FO) señaladas en 4.6.2. Para lograr una simulación hidrológica óptima se emplearán calibraciones mediante la variación de parámetros vía manual, y posteriormente vía automática. La calibración automática varía los parámetros usando el algoritmo *SCE-UA* señalado en la sección 2.2.6, donde se adoptan valores en un rango predefinido por el usuario y como resultado el software TETIS entrega de forma automática los índices de eficiencia (*Nash-Sutcliffe*, *RMSE*, entre otros). En la Figura 4-19 se muestra de forma gráfica la metodología propuesta: los cuadros en verde de la segunda fila señalan en qué consiste cada etapa, y los cuadros de color naranja de la fila inferior contienen los objetivos a lograr en cada etapa.

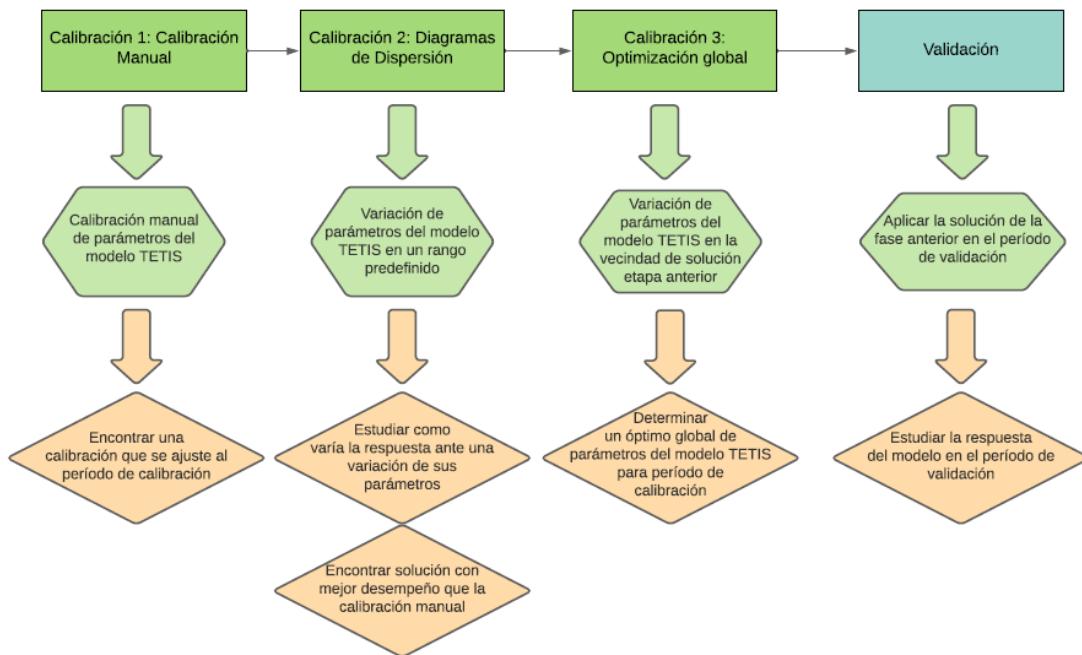


Figura 4-19: Metodología propuesta para Calibración-Validación

Etapa 1 - Calibración Manual

En esta etapa se realizó una calibración manual de todos los parámetros de modelación hidrológica con el software TETIS, con el objetivo de lograr un primer ajuste de los parámetros. De forma tentativa, esto permite encontrar un rango en donde los parámetros en conjunto entreguen una respuesta satisfactoria a la simulación hidrológica. La solución inicial empleada es la que viene por defecto en el software TETIS, a partir de la cual se variaron uno por uno los parámetros que contiene el modelo hasta que los índices de eficiencia de la simulación hidrológica no cambien significativamente.

Etapa 2 - Análisis de Sensibilidad: Diagramas de Dispersión

A partir de la solución de la primera etapa, se procede variando los parámetros que contiene el modelo TETIS dentro de un rango predefinido (siendo este un rango más acotado que el de la etapa anterior) con el fin de estudiar la sensibilidad de la respuesta hidrológica de cada uno de los parámetros. Posteriormente, usando el algoritmo *SCE-UA* se realizaron un total de 500 simulaciones hidrológicas, con el objetivo de elaborar las gráficas de diagramas de dispersión: cada gráfica muestra el comportamiento de cada uno de los parámetros del modelo hidrológico vs el índice de eficiencia de *Nash-Sutcliffe*. Cabe señalar que el

algoritmo, al ser mono-objetivo, se configura en el software para buscar el óptimo en términos de la eficiencia de *Kling-Gupta* (KGE).

Etapa 3 – Etapa 4: Optimización Global - Validación

En la etapa de optimización global se utilizaron los resultados de las etapas anteriores, de donde a partir de la solución inicial determinada en la primera etapa, junto con las tendencias detectadas en los diagramas de dispersión de la etapa anterior, permitieron dejar algunas variables constantes. Posteriormente, se efectuaron un total de 200 simulaciones hidrológicas con el algoritmo *SCE-UA* (usando la función objetivo *KGE* para la optimización), variando los parámetros que presentan una sensibilidad significativa en el modelo hidrológico TETIS. Los rangos de los parámetros son más acotados que en las fases anteriores, lo que asegura que la solución sea encontrada en un tiempo computacional menor. Por último, con la solución determinada en esta etapa, se procedió con la simulación hidrológica del período de Validación 2015-2018 para revisar la respuesta hidrológica en términos de los índices de eficiencia.

4.7 Evaluación de la incertidumbre espacial de la precipitación: Obtención de distancias de flujo

4.7.1 Obtención Mapa de Distancias de Flujo

Con el objeto de determinar la incertidumbre espacial de la precipitación en la cuenca del “Río Colorado”, es necesario obtener el mapa de distancias de flujo como información de entrada. La distancia de flujo indica, para cada posición (x, y) de la cuenca de estudio, la distancia hasta el punto de salida de la cuenca siguiendo el curso del agua. Para su determinación se requiere como entrada el mapa de direcciones de flujo señalado en la sección 4.1.1, que mediante el uso de herramientas del software ArcGIS, entrega como resultado el mapa de distancia de flujo. En la Figura 4-20 se muestra el mapa de distancia de flujo de la cuenca de estudio.

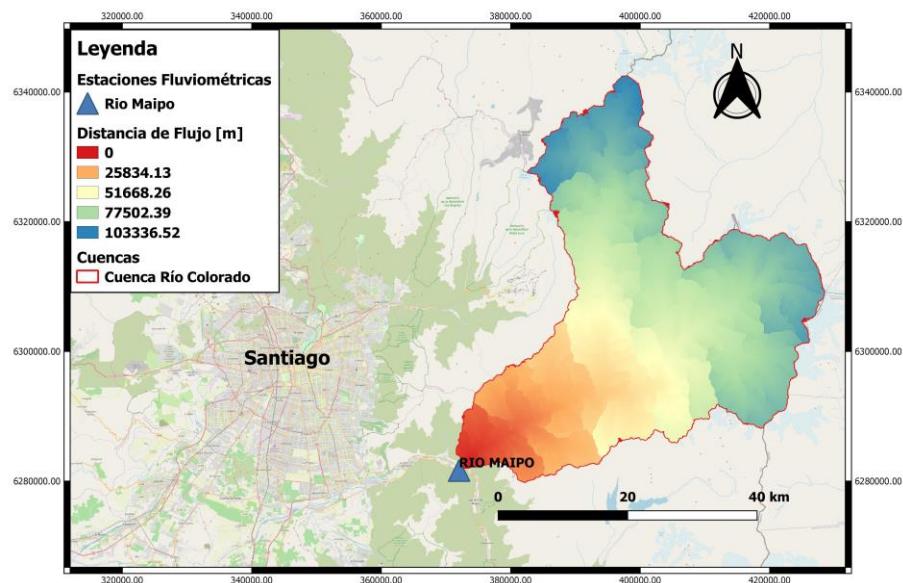


Figura 4-20: Mapa de distancia de flujo de cuenca Río Colorado

4.7.2 Obtención de Distancias de Flujo – Puntos CR2MET

A partir del mapa de distancias de flujo determinado en la sección 4.7.1, y a partir de los productos grillados CR2MET considerados para la cuenca de estudio, se utilizan herramientas del software QGIS para extraer la información de distancia de flujo de cada uno de dichos puntos (consultar en Anexo II). Cabe señalar que esto divide la cuenca en tantos sectores como puntos se disponga (en este caso son 64), en donde cada sector presenta una distancia de flujo aproximadamente constante. Luego, con esta información se calculan las variables requeridas para la evaluación de la incertidumbre.

4.8 Hidrograma Unitario Sintético

4.8.1 Hidrograma Unitario de Snyder (HUS)

En el contexto de *tormentas de alto impacto*, y con el fin de comparar los resultados obtenidos con formulaciones teóricas, se determinará el tiempo al peak del HUS. En primer lugar, para su determinación se requieren datos geomorfológicos de la cuenca de estudio, que se obtienen usando herramientas del software QGIS. Una vez obtenida la información, se evalúan las expresiones que se presentan a continuación (Stowhas, 2016). Los valores adoptados de las constantes y los datos geomorfológicos requeridos se muestran en la Tabla 4-15.

> Tiempo al peak:

$$t_p = C_D (L\bar{L})^{0.3}$$

> Duración efectiva tormenta:

$$t_{LL} = \frac{t_p}{5.5}$$

> Tiempo al peak corregido:

$$t_{pc} = t_p + \frac{t_R - t_{LL}}{4}$$

Tabla 4-15: Constantes y Datos Geomorfológicos - HUS

Hidrograma Unitario Snyder (HUS)			
Constante	Valor	Datos geomorfologicos	Largo [km]
C_D	1.5	L	66.11
C_P	0.17	\bar{L}	58.33

5 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del presente trabajo organizados por secciones. En primer lugar, se muestran los mapas resultantes del tratamiento de mapas, de acuerdo a las fuentes utilizadas. En segundo lugar, se muestran los resultados del tratamiento datos de caudal empleados para la modelación hidrológica. En tercer lugar, se muestran los resultados de la modelación hidrológica usando el software TETIS para el período de estudio. Por último, se presentan los resultados de la evaluación de la incertidumbre espacial para la cuenca de interés.

5.1 Resultados del tratamiento de mapas

En esta sección se muestran los resultados referentes al tratamiento de mapas, y que se encuentran divididos según las fuentes empleadas para su obtención, esto es: *MED*, *Mapa Geológico de Chile*, *SOTERLAC*, *Land Cover*, y por último *Multi-Origen*. Los mapas de entrada para el software TETIS se presentan en el Anexo IV, además de las consideraciones a tener en cuenta por parte del usuario del modelo hidrológico.

5.1.1 Mapas derivados del MED

A continuación en la Figura 5-1 se muestran los mapas derivados del MED, cuyo tratamiento fue señalado en la sección 4.1.1. Todos los mapas presentados son requeridos como información de entrada para la modelación hidrológica con el software TETIS.

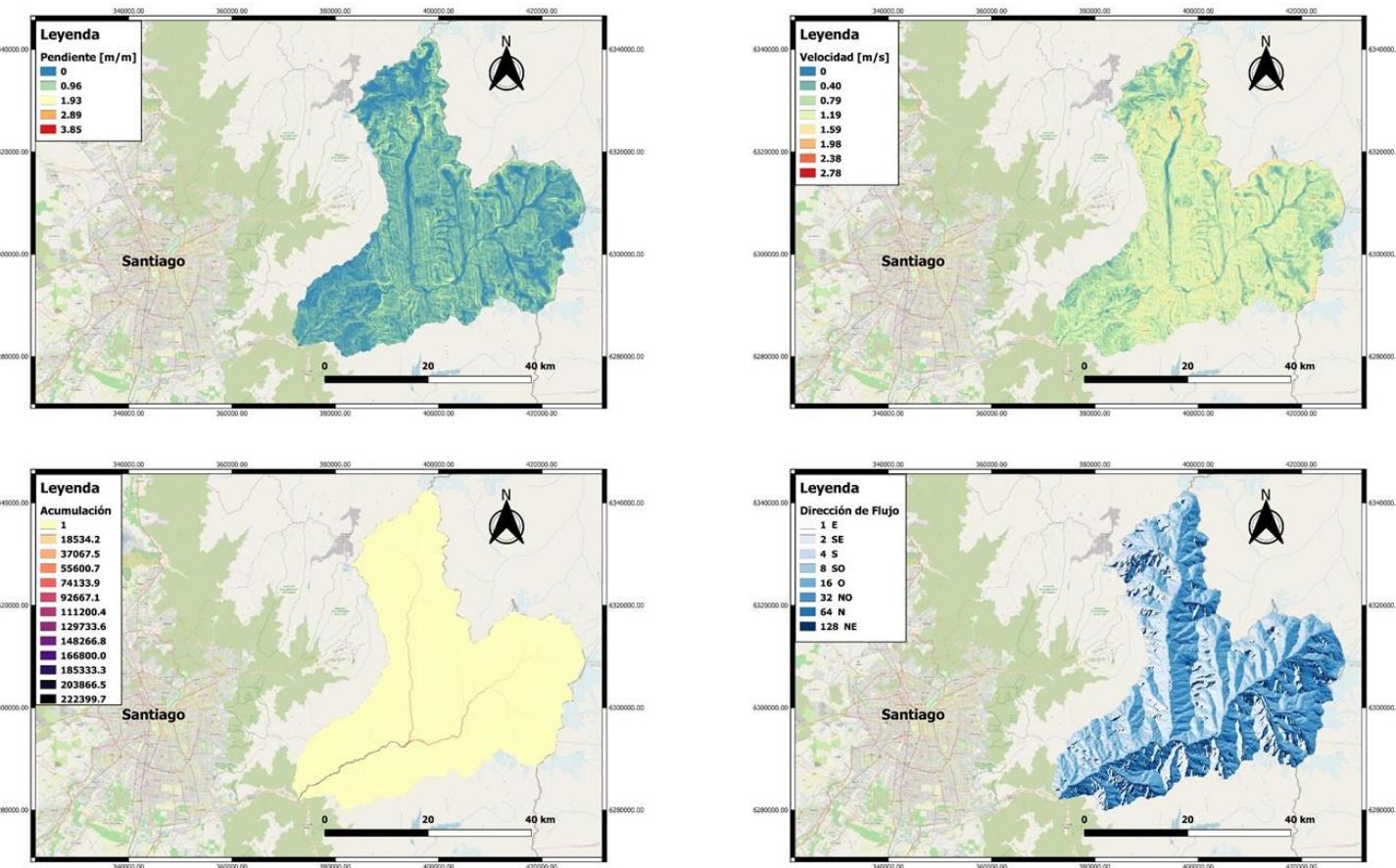


Figura 5-1: Mapa de pendientes, velocidad, acumulación y dirección de flujo (señalados de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha)

5.1.2 Mapas derivados del Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN)

En la Figura 5-2 se muestran los mapas resultantes del Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN). Cabe recordar que el mapa de conductividad hidráulica de acuífero K_{sa} no se muestra, ya que es equivalente al mapa de capacidad de percolación K_p . Ambos mapas presentados son requeridos como información de entrada para la modelación hidrológica.

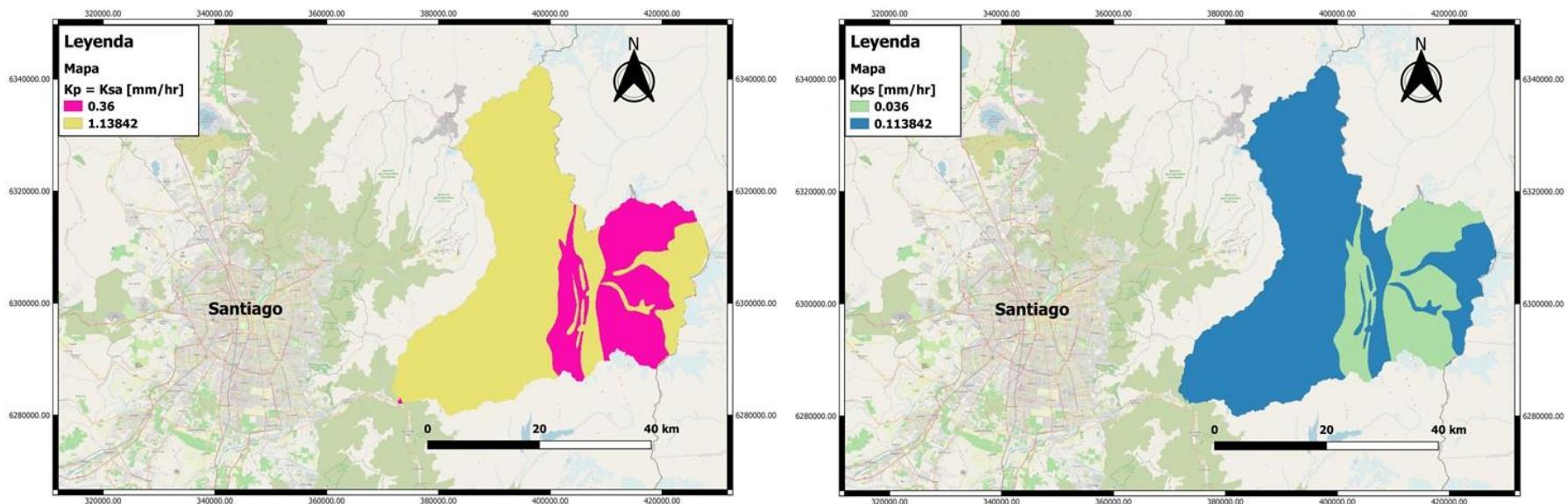


Figura 5-2: Mapa Kp-Ksa y Mapa Kps (señalados de izquierda a derecha)

5.1.3 Mapas derivados de SOTERLAC

En la Figura 5-3 se muestran los mapas de capacidad de infiltración K_s y el mapa de contenido de agua AWC_{TOP} . Como se señala en la leyenda del mapa de la izquierda, el mapa K_s es equivalente al mapa de conductividad hidráulica del interfluo K_{ss} . Por ende y por motivos de simplicidad, el mapa K_{ss} no se adjunta en los mapas resultantes. En este caso, solamente el mapa K_s es requerido como información de entrada para la modelación hidrológica, mientras que el mapa AWC_{TOP} es necesario para determinar el mapa de almacenamiento estático H_u .

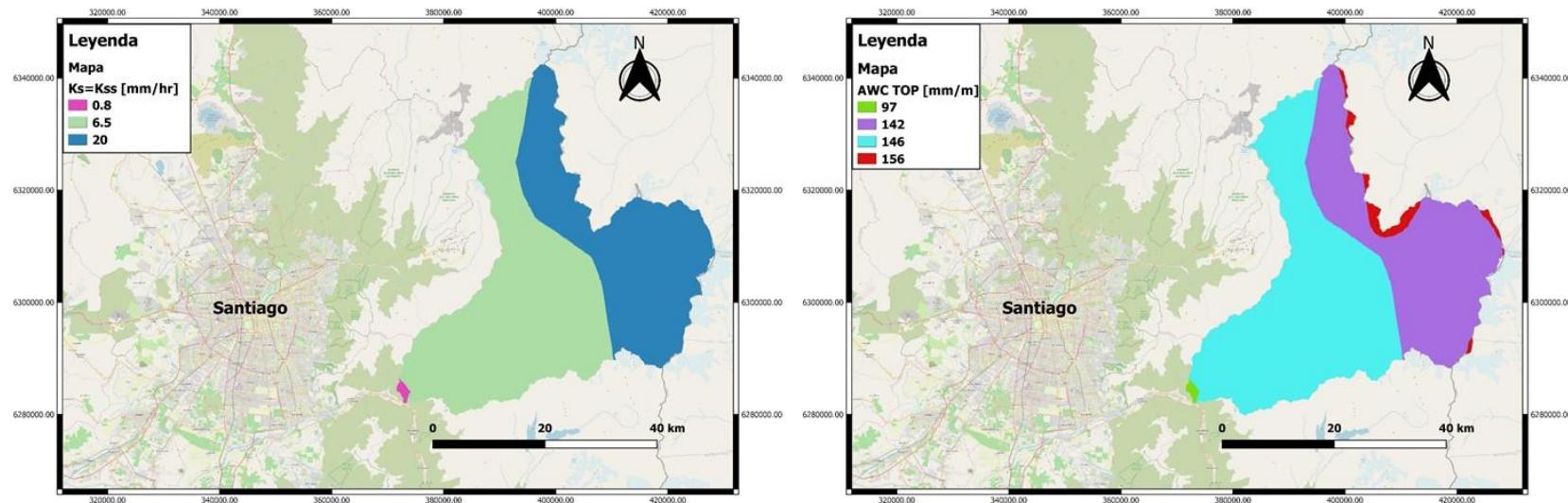


Figura 5-3: Mapa Ks-Kss y Mapa AWC-TOP (señalados de izquierda a derecha)

5.1.4 Mapas derivados de Land Cover

En la Figura 5-4 se muestran los mapas resultantes derivados del mapa base Land Cover Chile. Todos los mapas fueron obtenidos con la metodología presentada en 4.1.4. Para la modelación con el software TETIS, solamente el mapa de uso de suelos es requerido como información de entrada, mientras que el mapa de almacenamiento en charcos y profundidad de raíces son necesarios para determinar el mapa de almacenamiento estático H_u .

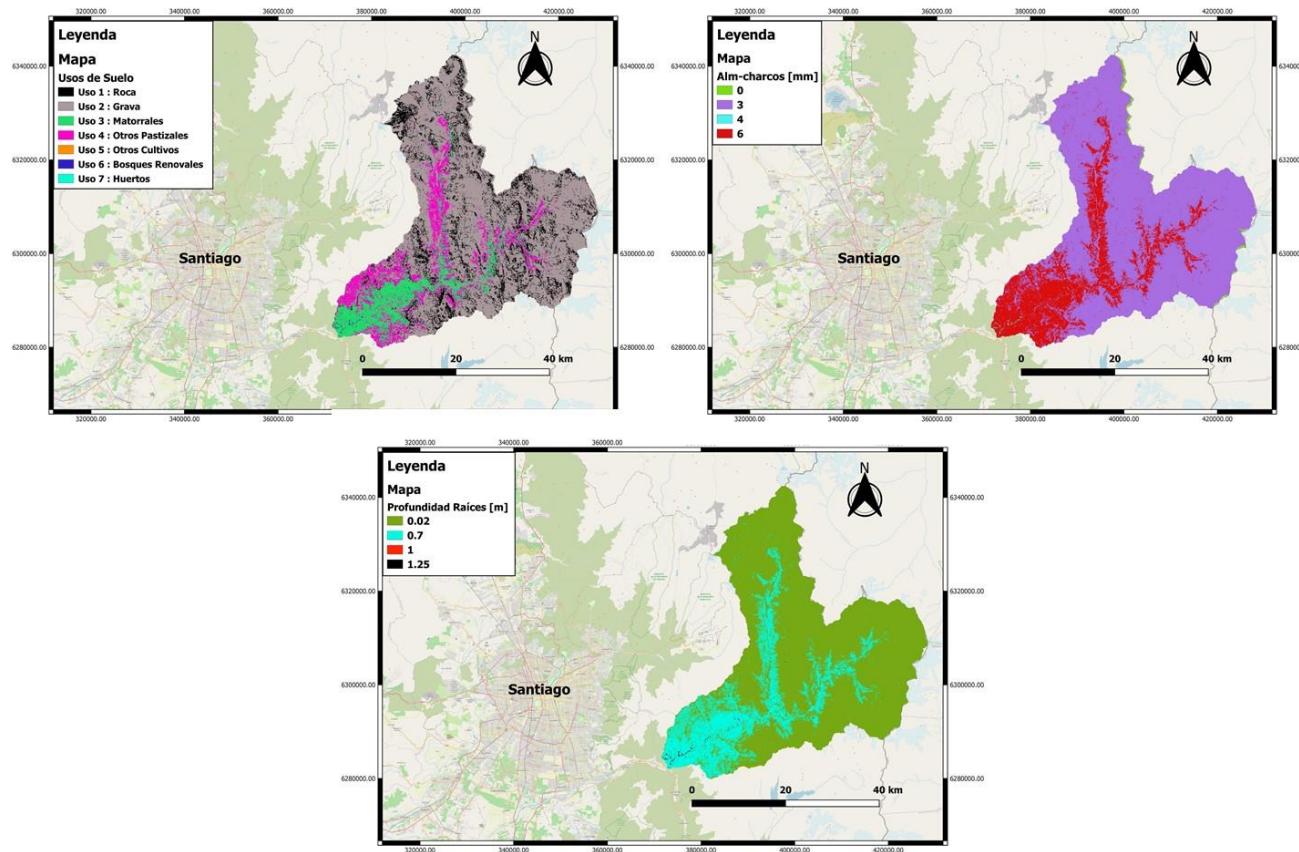


Figura 5-4: Mapa de Uso de Suelo, Mapa de Almacenamiento de charcos y Mapa de Profundidad de raíces (señalados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo)

5.1.5 Mapas Multi-Origen

A partir de los tratamientos señalados en la sección 4.1.5 se obtienen como resultados los Mapas Multi-Origen (denominados de esta manera debido a que requieren más de una fuente para su obtención), que se muestran la Figura 5-5. El mapa de almacenamiento estático H_u (mapa a la izquierda) se obtiene de la superposición de dos mapas, siendo uno de ellos el mapa de almacenamiento superficial (mapa a la derecha). La modelación hidrológica con el software TETIS requiere únicamente al mapa H_u como información de entrada. Cabe destacar que en gran parte del mapa H_u existe un valor cercano a los 8mm, que al ser bajo implica que dichos sectores (en color rojo) tienen una menor capacidad de retención de agua, y aportan en mayor medida a la escorrentía total.

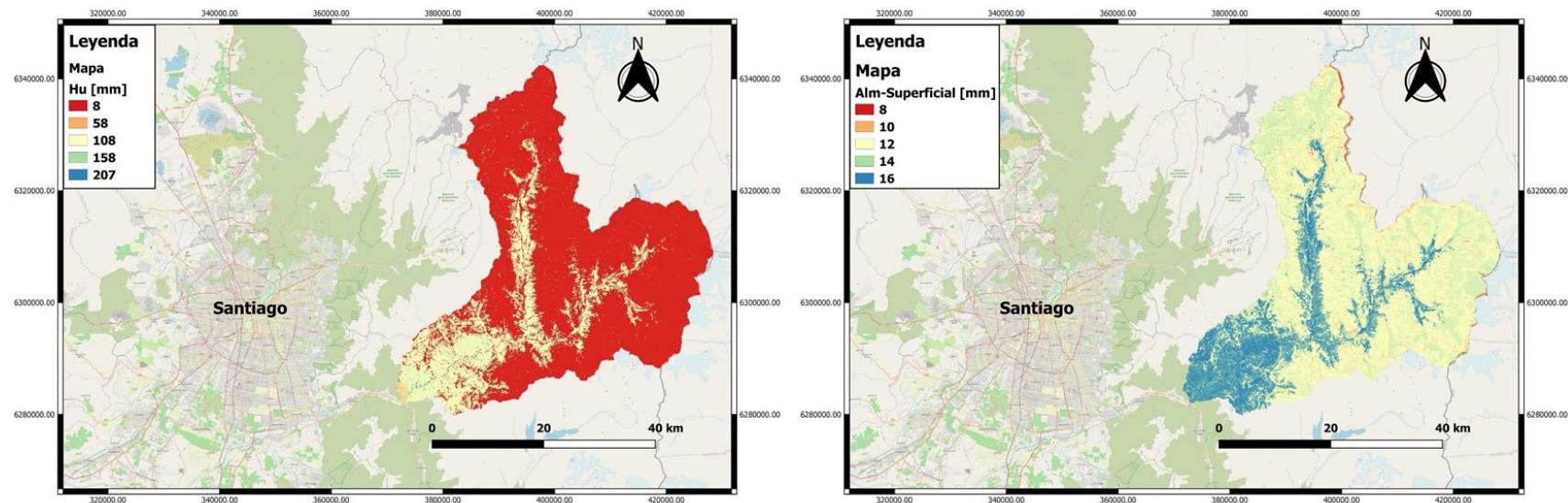


Figura 5-5: Mapa Hu y Mapa Alm-Superficial (señalados de izquierda a derecha)

5.2 Datos de Caudal

Los datos de caudal medio diario del punto de salida de la cuenca se obtuvieron luego de llenar los datos faltantes de la estación “Río Colorado” de acuerdo a los métodos de interpolación señalados en 4.3.2 (Transposición de Caudales Medios, Método de Regresión Lineal y Método de Correlación Ortogonal), y tomando como referencia la estación patrón “Río Maipo”. Posteriormente, se escoge el método que presente el mínimo error de estimación según la comparación de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Absoluto Medio (EAM). Cabe destacar que los datos llenados son estimados usando los métodos de interpolación a partir de toda la serie de caudales de la estación “Río Maipo”, mientras que los datos observados corresponden a la serie de caudales de la estación “Río Colorado” presentada en 4.3.1. A continuación, se muestran los resultados de forma gráfica, y luego se presenta la comparación y elección del método de interpolación.

Transposición de Caudales Medios

Los resultados para el método de Transposición de Caudales Medios se muestran en la Figura 5-6 en color rojo y en color verde los datos observados. En general se observa una sobreestimación de los valores de caudal con respecto a los datos observados, obteniéndose como resultado un caudal promedio de datos observados de $22.98 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal promedio con datos llenados de $28.55 \text{ m}^3/\text{s}$ (esto considera solamente los días en que existen datos observados).

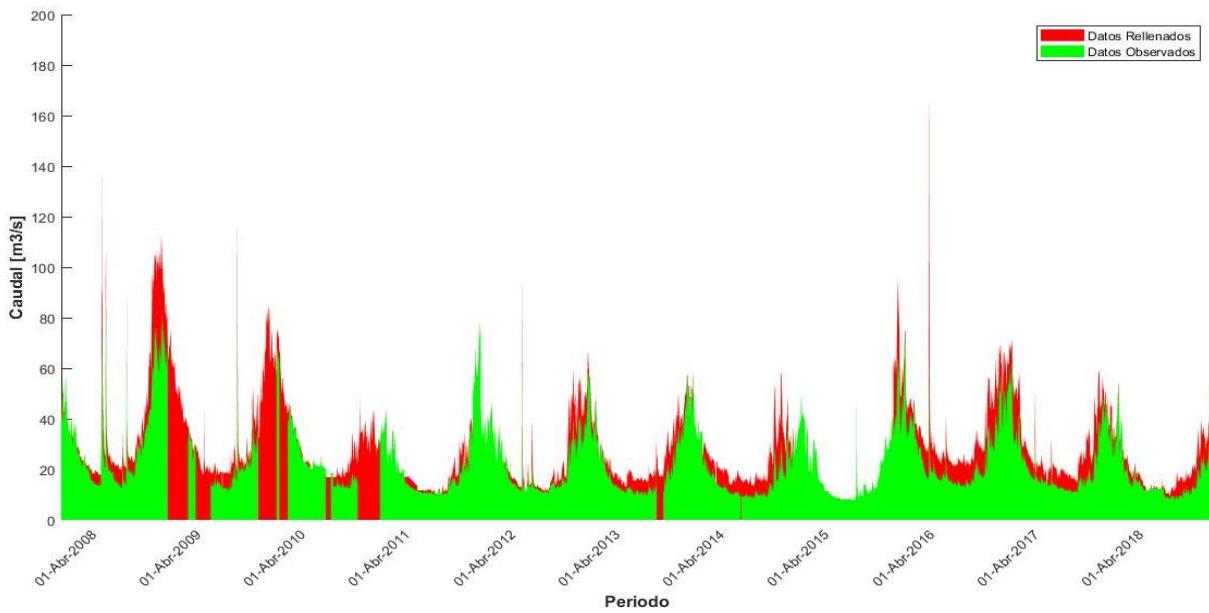


Figura 5-6: Datos rellenos - Método de Transposición de Caudales

Método de Regresión Lineal

Los datos rellenos mediante el método de Regresión Lineal se muestran en la Figura 5-7 en color rojo y en color verde se muestran los datos observados. En general se observa un buen ajuste entre los datos observados y simulados, obteniéndose un caudal promedio de los datos observados de 22.98 m³/s y un caudal promedio con datos rellenos de 22.98 m³/s (esto considera solamente los días en que existen datos observados).

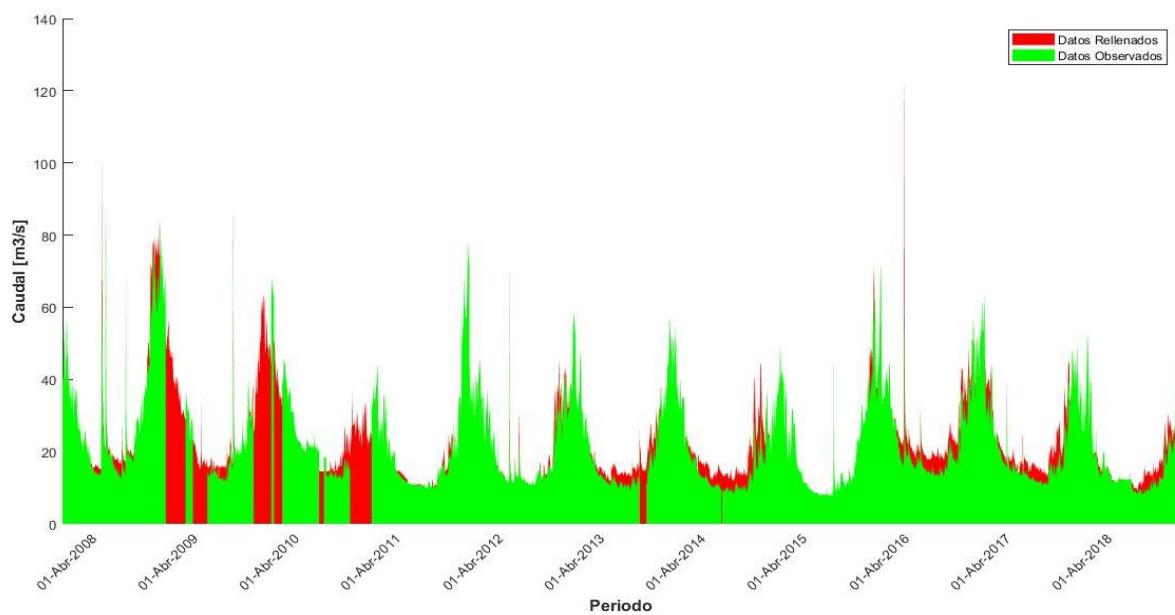


Figura 5-7: Datos rellenos – Método de Regresión Lineal

Método de Correlación Ortogonal

Los datos rellenos con el método de Correlación Ortogonal se muestran en la Figura 5-8 en color rojo y en color verde se muestran los datos observados. De igual manera que en el método de regresión lineal, se observa una buena estimación de los datos, en donde el caudal de promedio observado es de 22.98 m³/s y el caudal promedio con datos rellenos es de 22.98 m³/s.

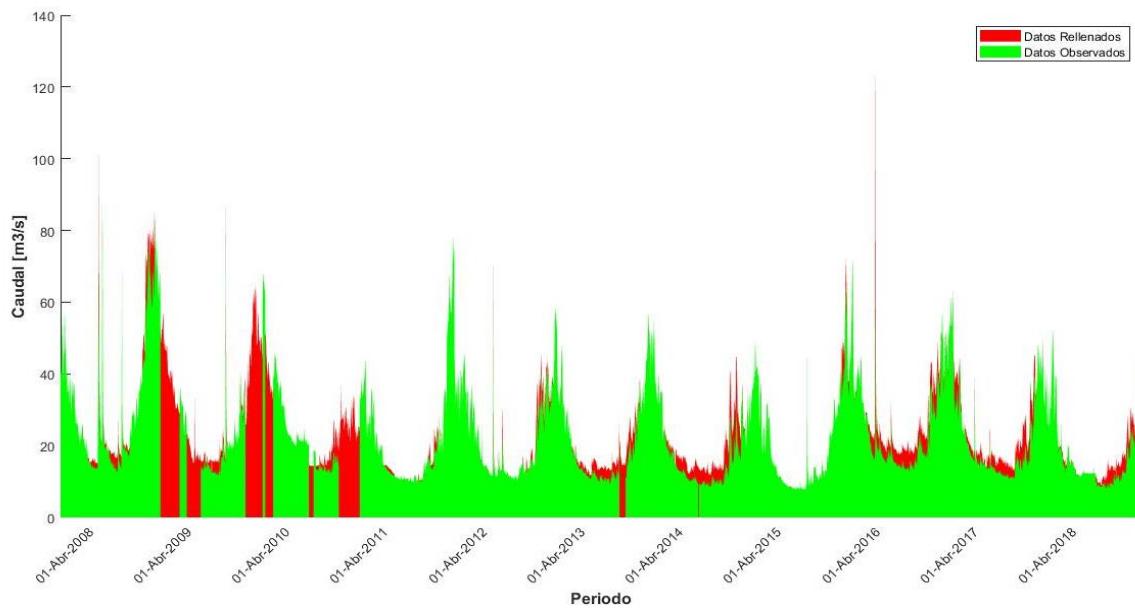


Figura 5-8: Datos rellenos – Método de Correlación Ortogonal

Comparación y elección del método

Para comparar los resultados de los tres métodos previamente señalados, se utilizaron los métodos RMSE y EAM como índices de error, los que fueron calculados para cada método. Los resultados se adjuntan a continuación en la Tabla 5-1, en donde se observa que el desempeño del método de regresión lineal y de correlación ortogonal es bastante similar.

Tabla 5-1: Resultados RMSE y EAM para cada método

Método de Relleno	RMSE	EAM
Transposición de Caudales	9.56	6.83
Regresión Lineal	6.31	4.17
Correlación Ortogonal	6.32	4.16

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla adjunta, se elige el método de Regresión Lineal para llenar la estadística con los datos faltantes de Caudal Medio Diario en la estación Río Colorado, a partir de la estación Río Maipo perteneciente a la cuenca “Alto Maipo” (tal como se explica en la sección 4.3.2). En la Figura 5-9 se muestra la estadística de Caudal Medio Diario utilizados en la modelación hidrológica. Con los datos obtenidos, se determinó el caudal asociado al percentil 95%, que entrega un resultado igual

a 50.7 m³/s. Este dato permite definir las *tormentas de alto impacto*, que son las que conducen a una escorrentía igual o mayor al valor señalado (este concepto es empleado en la sección 5.4).

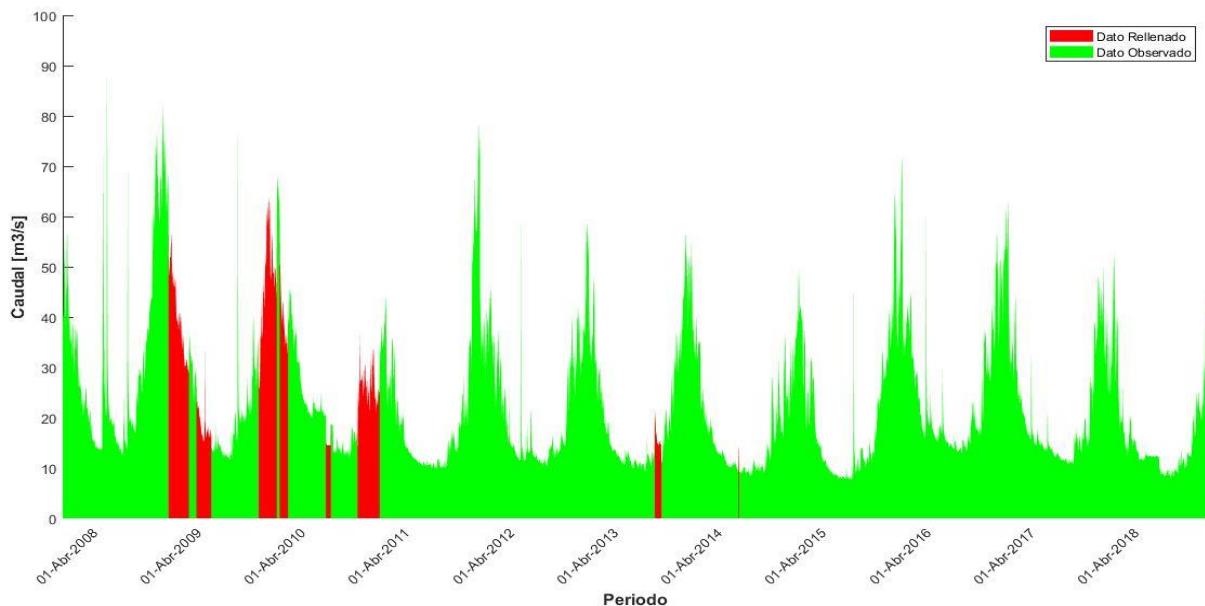


Figura 5-9: Datos de Caudal Medio Diario utilizados en la modelación hidrológica

5.3 Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica se realizó de acuerdo con los períodos de modelación, los cuales son: Calibración 2008-2015 y Validación 2015-2018. El Período de Calibración comienza con un régimen lluvioso en los años 2008 y 2009, con una precipitación anual acumulada de 635mm y 467mm, respectivamente (registrada en la estación “Maitenes Bocatoma”). Pero, en el año 2010 existe una baja significativa en los eventos de precipitaciones, con una precipitación media anual de 248mm, mientras que en los años posteriores se observa una recuperación del régimen de precipitación, alcanzando un valor de 415mm en el año 2015 (consultar valores en Figura 3-4 de la sección 3.3). Esto se refleja en que los mayores caudales medios diarios se encuentran en los años 2008-2009, y en la disminución del hidrograma que es evidente en el período 2010-2011 (ver Figura 5-9). El Período de Validación comienza con un régimen lluvioso durante el año 2016, con una precipitación anual acumulada de 526mm en la estación “Maitenes Bocatoma”, pero que finaliza en un régimen más seco, alcanzando un valor de 246mm en el

año 2018 (consultar valores en Figura 3-4 de la sección 3.3). Dicha tendencia se manifiesta en una disminución progresiva del hidrograma en el período 2016-2018 (ver Figura 5-9).

La modelación hidrológica se basa en la metodología señalada en 4.6.3, en donde se ajustaron todos los parámetros de modelación para la etapa de Calibración, a partir de sus valores iniciales y de acuerdo a las funciones objetivo (FO) (presentados en 4.6.1 y 4.6.2, respectivamente). Posteriormente, en la etapa de Validación se consideró la solución de la Optimización Global (Etapa 3) de todos los parámetros para la simulación hidrológica. Por último, se revisaron los índices de desempeño de las funciones objetivo (FO) del período señalado.

5.3.1 Período de Calibración

Modelación Hidrológica: Valores iniciales

En la Figura 5-10 se observan los hidrogramas de caudal observado de la estación Río Colorado (en color azul) y el caudal simulado (en color rojo), mientras que en la parte superior se muestra la precipitación media. Adicionalmente, la Tabla 5-2 presenta la información sobre volumen total y caudal peak de los datos observados vs simulados, además de los resultados obtenidos de las FO consideradas en la modelación hidrológica. Cabe recordar que los Valores Iniciales empleados en esta etapa corresponden a los que asigna TETIS por defecto a los parámetros, y que fueron presentados en la sección 4.6.1.

Análisis Gráfico – Hidrograma

El hidrograma simulado evidencia una baja producción de escorrentía en comparación con los datos observados (notar que el hidrograma simulado se encuentra en general por debajo del hidrograma observado), además de no presentar mayores diferencias debido a variaciones estacionales durante el período estival (fusión de nieve). Pese a ello, se registran elevados valores peak de caudal simulado para los eventos de tormenta de alto impacto (que es más evidente en el período 2008-2010), mientras que para eventos de magnitud media y baja no presenta mayores aumentos. Por último, cabe destacar que el hidrograma del caudal simulado corresponde aproximadamente al flujo base del hidrograma del caudal observado, presentando ligeras variaciones en torno a dicho valor (sin considerar las crecidas en la escorrentía simulada en períodos de tormenta).

Análisis Cuantitativo - Resultados

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5-2, cabe señalar que el volumen simulado es un 49% menor al volumen observado (2696.5 Hm^3 vs 5305.9 Hm^3), reflejando una baja producción de escorrentía modelada. En cuanto al caudal peak del período, para el día 04-06-2008 el caudal simulado es de $170 \text{ m}^3/\text{s}$, que es un 87.88% mayor que el caudal observado para la fecha señalada ($90.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Dicha tendencia se repite en otras fechas: el día 15-08-2008 el caudal simulado es un 452.04% mayor que el caudal peak observado; el día 05-09-2009 el caudal simulado es un 1380.7% mayor que el caudal observado; y en otras fechas en menor medida. Por otra parte, los valores de las Funciones Objetivo (FO) consideradas evidencian un mal desempeño del caudal simulado, junto con una buena respuesta de la cobertura de nieve *SCA*. Además, se muestran los valores de las componentes del índice *KGE*, en donde se destaca que: el coeficiente r es bajo, lo que evidencia una deficiente correlación lineal; el coeficiente α es cercano a la unidad, lo que sugiere un buen ajuste de la variabilidad entre los datos observados y simulados; y el valor del coeficiente β indica un sesgo medianamente aceptable entre los datos observados y simulados.

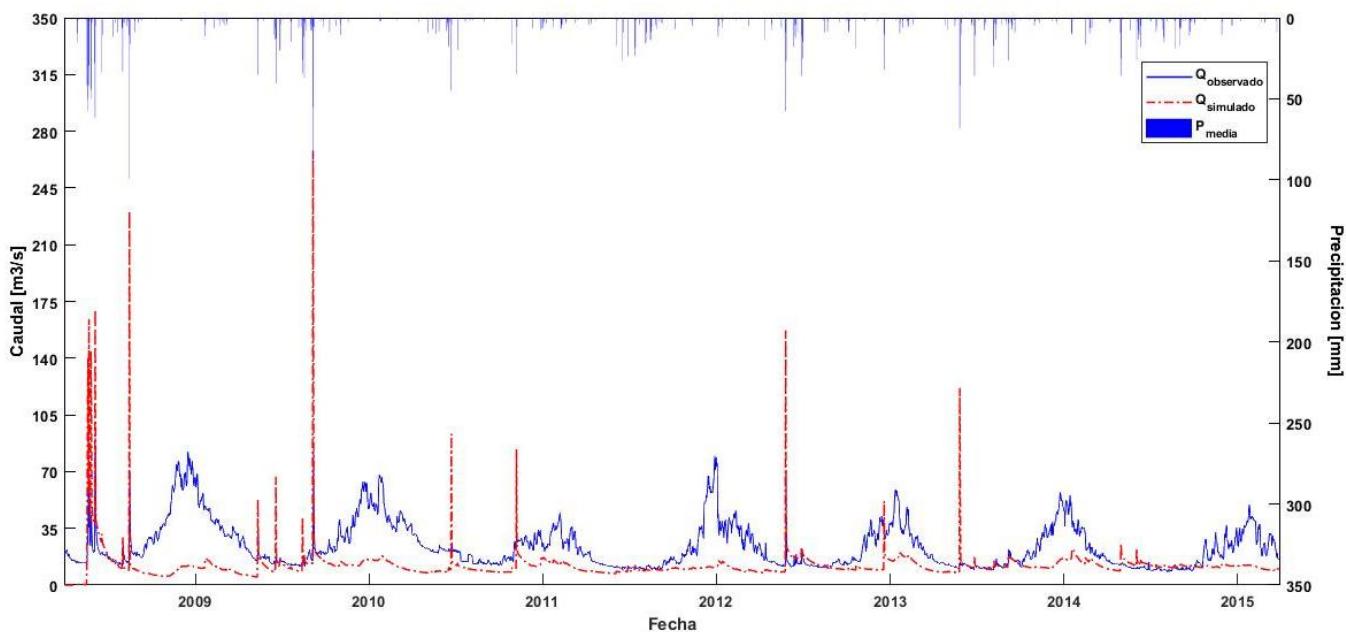


Figura 5-10: Hidrograma observado vs simulado - Modelación Hidrológica - Valores iniciales

Tabla 5-2: Resultados Caudal Peak y Volumen (observado vs simulado) - Modelación Hidrológica – Valores Iniciales

Caudal Peak y Volumen				Resultados F.O		
Medición	Observado	Simulado	Diferencia %	Variable	Índice	Valor
Volumen [hm ³]	5305.9	2696.5	-49.2%	Caudal	NSE	-1.15
Caudal peak [m ³ /s]	90.5	268	+196.15%	SCA	NSE	0.71
				Caudal	KGE	-0.01
Parámetros KGE						
				Caudal	r	0.13
				Caudal	α	0.82
				Caudal	β	0.51

Modelo Hidrológico – Flujos y Almacenamientos Medios

A continuación, se presentan gráficamente los flujos y almacenamientos medios de la cuenca obtenidos de la simulación con el software TETIS. Para esto el modelo entrega las series temporales de los flujos de entrada (ver Figura 5-11), flujos de salida (ver Figura 5-12), y los almacenamientos medios (ver Figura 5-13). Dicha información representa el balance hídrico a nivel de cuenca, asimismo indica los procesos físicos involucrados en la producción de escorrentía (revisar 2.2.2).

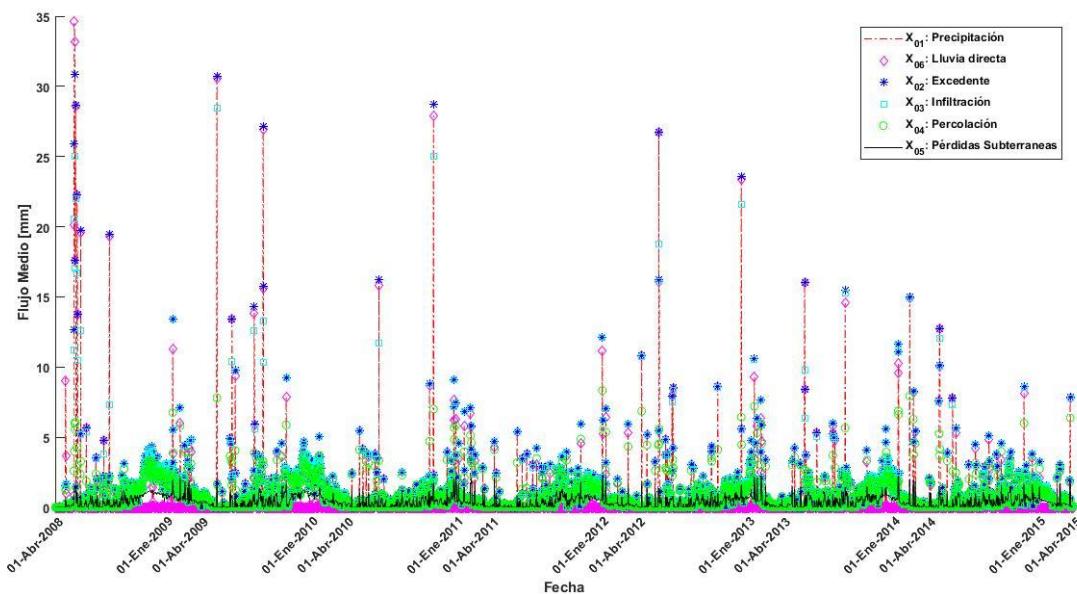


Figura 5-11: X - Flujos de Entrada - Modelación Valores Iniciales

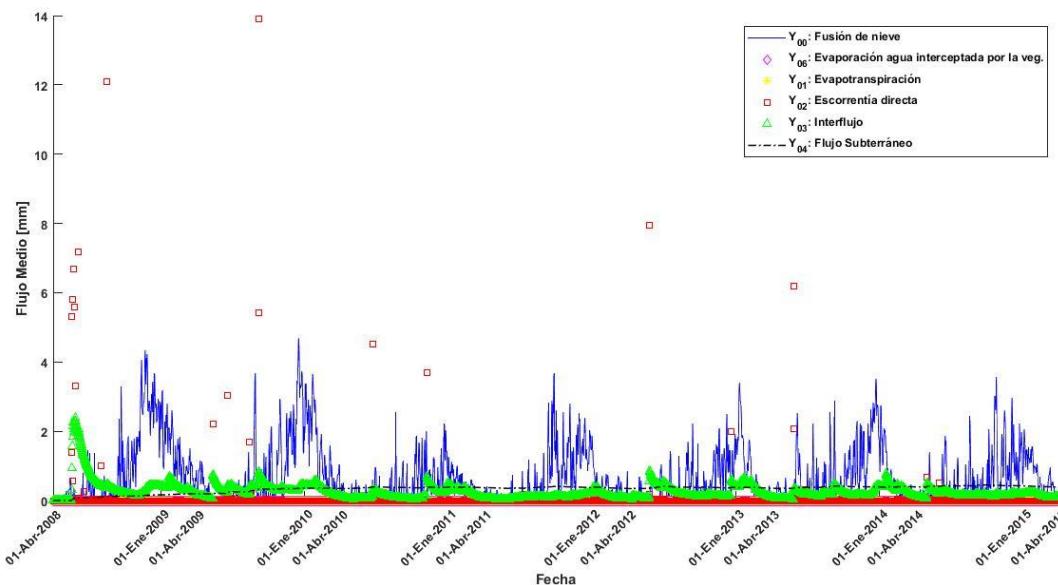


Figura 5-12: Y - Flujos de Salida - Modelación Valores Iniciales

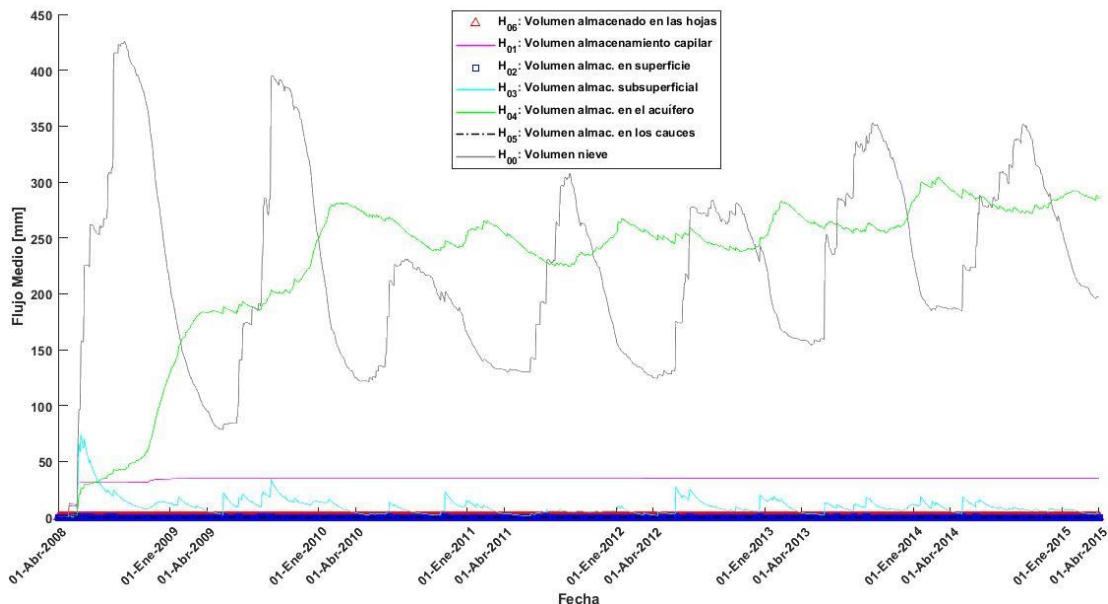


Figura 5-13: J - Almacenamientos Medios - Modelación Valores Iniciales

En primer lugar, respecto de los flujos de entrada: la precipitación (X_{01}) y la lluvia directa (X_{06}) tienen la misma magnitud durante el período, de igual manera ocurre con el excedente (X_{02}) vs la infiltración (X_{03}) (excepto en los días de tormentas de alto impacto, donde el excedente es mayor a la infiltración), mientras

que la percolación (X_{04}) es igual o mayor que las pérdidas subterráneas (X_{05}) (ambos presentan un aumento local en los días con lluvia). En segundo lugar, referente a los flujos de salida: la fusión de nieve (Y_{00}) presenta variaciones estacionales, junto con un valor máximo en el período estival; la escorrentía directa (Y_{02}) es considerable únicamente en las tormentas de alto impacto, también durante dichas fechas el interflujo (Y_{03}) presenta máximos locales de baja magnitud y con valores máximos durante el año 2009; por último, el flujo subterráneo (Y_{04}) comienza desde un valor nulo hasta adoptar valores en el rango 0.3 a 0.4 mm. En tercer lugar, en cuanto a los almacenamientos: el volumen de nieve (H_{00}) presenta variaciones estacionales, junto con una acumulación de nieve permanente (notar el “escalonamiento” de dicha gráfica); el almacenamiento en el acuífero (H_{04}) aumenta progresivamente desde un valor nulo hasta un valor máximo de 300 mm (notar máximos locales durante el período de verano); el almacenamiento capilar (H_{01}) presenta un aumento abrupto hasta adoptar un valor aproximado constante de 34.7 mm; el almacenamiento subsuperficial (H_{03}) adopta valores bajos, pero con aumentos locales en los días con lluvia; la variable de almacenamiento en las hojas (H_{06}) tiene un valor constante igual a 0.38 mm; el volumen de almacenamiento en los cauces (H_{05}) tiene una baja magnitud generalmente menor a H_{06} , con picos locales en los días de precipitación; y la variable (H_{02}) es nula durante todo el período, a excepción de los días con precipitaciones de alto impacto donde presenta aumentos diferenciales. Por otro lado, cabe destacar que las variables no mencionadas tienen valores nulos durante todo el período, tal como se evidencia en las gráficas.

Modelación Hidrológica: Etapa 1 – Calibración Manual

En la Figura 5-14 se observa el hidrograma simulado vs observado obtenido en la Etapa 1, junto con la precipitación media en la parte superior (la simbología es equivalente a la presentada en la Figura 5-10). Además, la Tabla 5-3 muestra los resultados de los parámetros de la calibración manual. Finalmente, la Tabla 5-4 presenta la información sobre volumen total y caudal peak de los datos observados vs simulados, además de los resultados obtenidos de las FO consideradas en la modelación hidrológica.

Análisis Gráfico – Hidrograma

La gráfica muestra que la producción de escorrentía simulada se ajusta bien al volumen observado, lo que se evidencia a partir de la similitud entre el hidrograma simulado y observado, y que es evidente sobretodo en los años 2013-2014 (advertir que las componentes de escorrentía directa y flujo base son casi idénticas en dichos años). Pero, en los años 2009-2012-2015 se presentan claras diferencias en el período estival, donde la gráfica simulada se encuentra por debajo de la observada. En cuanto a los valores de caudal peak, se observa que el caudal simulado es significativamente menor a los datos observados (notar diferencia en los días con tormentas mayores a 100 mm en los años 2008-2009).

Análisis Cuantitativo - Resultados

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5-4, se observa que la producción de escorrentía simulada vs observada se encuentra satisfactoriamente balanceada (5343 Hm³ vs 5305.9 Hm³), siendo el volumen total simulado un 0.7% mayor que la observada. En cuanto al caudal peak del período, para el día 04-06-2008 el caudal peak simulado es de 19.43 m³/s, que es 78.53% menor al caudal observado para la fecha señalada. De igual modo, la tendencia se repite en otras fechas: el día 16-08-2008 el caudal simulado es un 59.83% menor que el caudal observado; el día 06-09-2009 el caudal simulado es un 44.04% menor que el caudal observado; y el día 27-05-2012 el caudal simulado es un 71.55% menor que el caudal observado. Por otra parte, los resultados de las Funciones Objetivo (FO) reflejan considerables mejoras de la simulación hidrológica en términos de caudal, pero con una degradación de la modelación de la cobertura de nieve SCA que adopta un valor de NSE de 0.44 (tomando como referencia la modelación con los Valores Iniciales). Adicionalmente, se muestran los valores de las componentes del índice KGE, en donde se destaca que: el coeficiente r tiene una mejora significativa con respecto a los valores iniciales (pasa de 0.13 a 0.78), entregando un buen ajuste de correlación lineal; el coeficiente α es cercano a la unidad y a su vez similar al escenario anterior (ligera mejora de 0.82 a 0.84), lo que indica un buen ajuste de la variabilidad; y el valor del coeficiente β mejora considerablemente, adoptando un valor unitario (pasa de 0.51 a 1.0), que advierte un sesgo entre datos simulados y observados de carácter óptimo.

Tabla 5-3: Valores parámetros - Modelación Hidrológica - Etapa 1

Valores Calibración Manual					
Factor Corrector	Valor	Tanque Estado Inicial	Valor	Parámetros de fusión	Valor
FC_0	1.2	H_1	0.0	M_f	4.0
FC_1	35.0	H_2	0.0	M_f^*	8.0
FC_2	1.0	H_3	0.0	T_b	1.5
FC_3	0.5	H_4	1300.0		
FC_4	5.0	H_5	0.0		
FC_5	0.1	H_6	0.0		
FC_6	10.0				
FC_7	1.0				
FC_8	100.0				
FC_9	0.05				

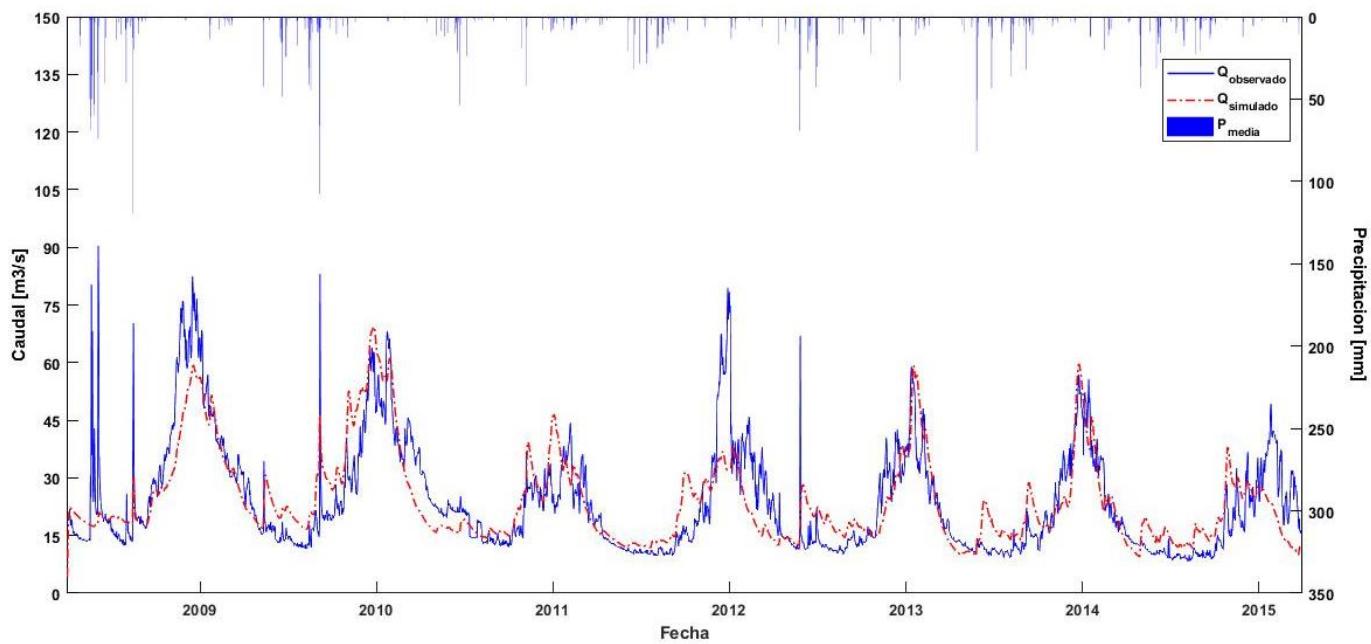


Figura 5-14: Hidrograma observado vs simulado – Modelación Hidrológica - Etapa 1

Tabla 5-4: Resultados Caudal Peak - Volumen - Modelación Hidrológica - Etapa 1

Caudal Peak y Volumen				Resultados F.O		
Medición	Observado	Simulado	Diferencia %	Variable	Índice	Valor
Volumen [hm ³]	5305.9	5343.0	+0.7%	Caudal	NSE	0.61
Caudal peak [m ³ /s]	90.5	69.3	-23.4%	SCA	NSE	0.44
				Caudal	KGE	0.73
Parámetros KGE						
				Caudal	r	0.78
				Caudal	α	0.84
				Caudal	β	1.00

Modelo Hidrológico – Flujos y Almacenamientos Medios

De igual modo que en la modelación hidrológica anterior, se presentan gráficamente los flujos de entrada (ver Figura 5-15), flujos de salida (ver Figura 5-16) y almacenamientos medios (ver Figura 5-17) entregados por el software TETIS. En primer lugar, respecto de los flujos de entrada: la precipitación (X_{01}) y la lluvia directa (X_{06}) tienen la misma magnitud durante el período, de igual manera ocurre con el excedente (X_{02}) vs la infiltración (X_{03}), y la percolación (X_{04}) vs las pérdidas subterráneas (X_{05}) (notar que este último par de variables adoptan magnitudes bajas no mayores a 2 mm). En segundo lugar, referente a los flujos de salida: la fusión de nieve (Y_{00}) y el interflujo (Y_{03}) presentan variaciones estacionales que adoptan su valor máximo anual durante el período estival; la variable de escorrentía directa (Y_{02}) adopta valores no nulos únicamente en los eventos de tormenta de alto impacto, mientras que el flujo subterráneo (Y_{04}) desciende progresivamente desde un valor máximo de 1.2 mm hasta un valor mínimo de 0.12 mm al final del período. En tercer lugar, en cuanto a los almacenamientos: el volumen de nieve (H_{00}) presenta variaciones estacionales (notar la similitud en el comportamiento de la segunda mitad del período); el almacenamiento en el acuífero (H_{04}) comienza con un valor de 1300 mm para ir descendiendo hasta un valor de 176.8 mm al finalizar; el almacenamiento capilar (H_{01}) incrementa progresivamente desde un valor nulo hasta un valor máximo de 1153.5 mm; el almacenamiento subsuperficial (H_{03}) adopta valores bajos en comparación con las otras variables, junto con máximos locales en el período estival; la variable de almacenamiento en las hojas (H_{06}) tiene un valor constante igual a 0.38 mm; el volumen de almacenamiento en los cauces (H_{05}) tiene una baja magnitud generalmente menor a H_{06} , con picos locales en los días de precipitación; y la variable (H_{02}) es nula durante todo el

período, a excepción de los días con precipitaciones de alto impacto donde presenta aumentos diferenciales. Por otro lado, cabe señalar que las variables no mencionadas poseen valores nulos durante todo el período, tal como se puede apreciar en las gráficas.

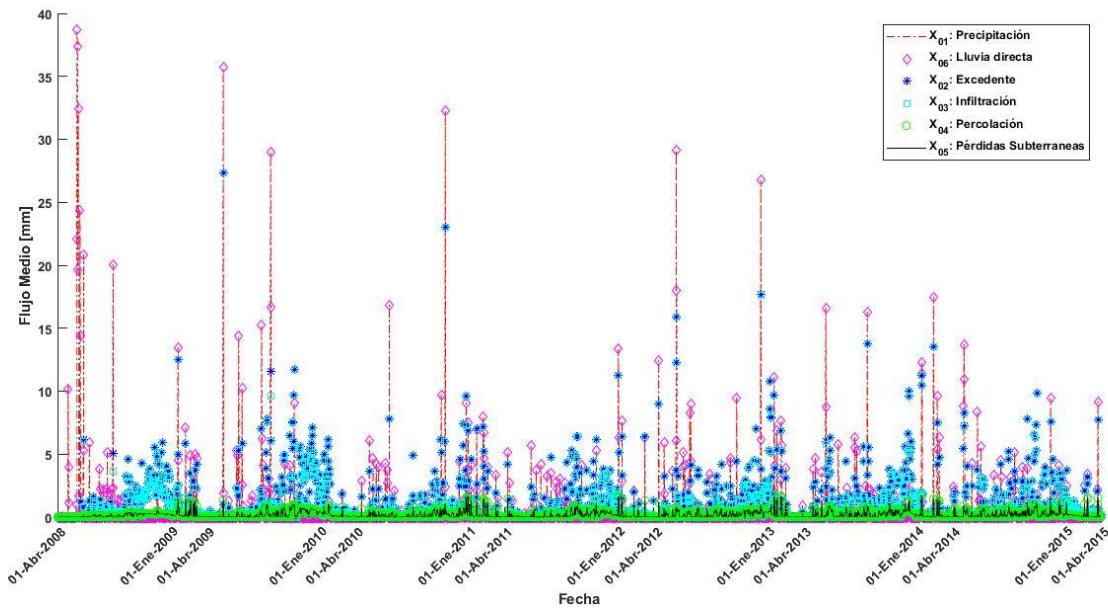


Figura 5-15: X - Flujos de Entrada - Modelación Etapa 1

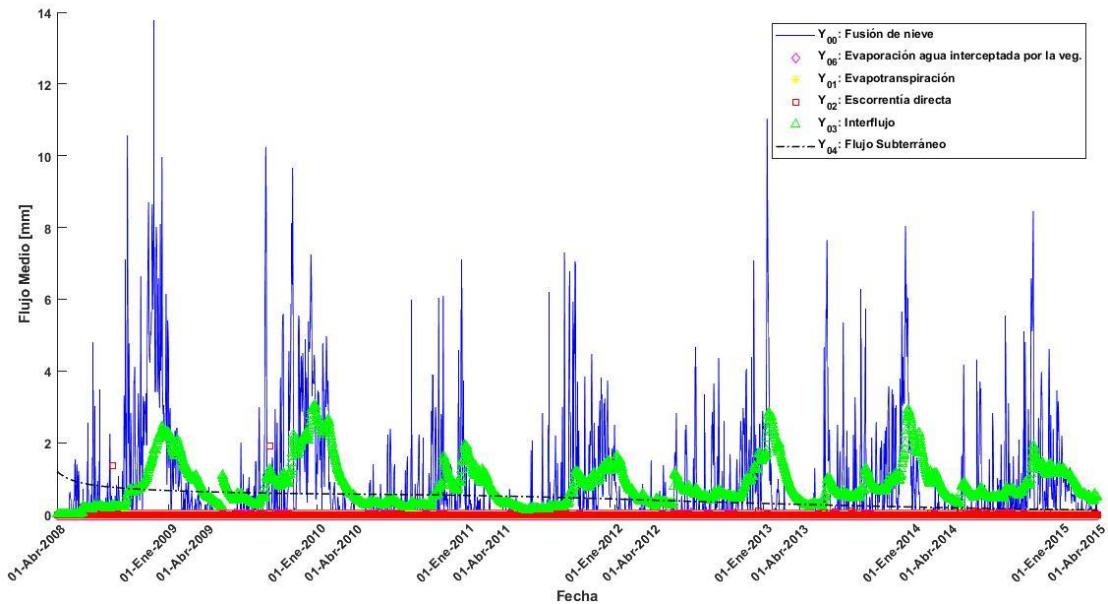


Figura 5-16: Y - Flujos de Salida - Modelación Etapa 1

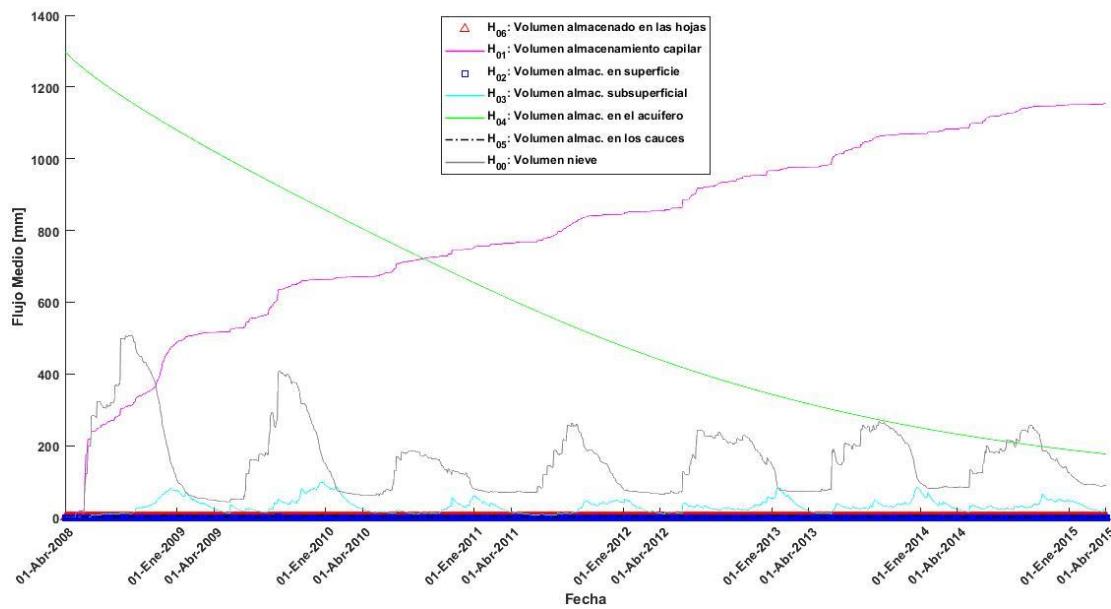


Figura 5-17: J - Almacenamiento Medio - Modelación Etapa 1

Etapa 2 – Análisis de Sensibilidad: Diagramas de Dispersion

En la Tabla 5-5-Tabla 5-6-Tabla 5-7 se muestran los rangos adoptados para la variación de parámetros de los factores correctores, tanques de estado inicial y parámetros de fusión de nieve, respectivamente. Luego de efectuar las 500 simulaciones hidrológicas, se obtiene como resultado los diagramas de dispersión que se muestran en las figuras adjuntas (ver Figura 5-18-Figura 5-19-Figura 5-20), que incluyen únicamente las simulaciones cuyo valor de NSE se encuentran entre 0 a 0.8 (los Diagramas de Dispersion con todas las simulaciones efectuadas incluyen en su mayoría valores de NSE menores a 0, los que se pueden consultar en la sección Anexo V). De acuerdo a las gráficas, los parámetros del modelo hidrológico adoptan valores aleatorios dentro del rango de variación, cuya interacción entrega como resultado valores muy diversos (y en general deficientes) de NSE , y en donde la simulación con los valores iniciales entrega el mejor desempeño. Por otra parte, se aprecia una tendencia a entregar mejores rendimientos para valores nulos de los parámetros H_3-H_5 (consultar Diagramas de Dispersion - Tanques de Estado Inicial en Anexo V). En base a lo señalado, se sugiere que los rangos de valores óptimos de los parámetros se pueden acotar aún más, y que a su vez éstos se encuentran contenidos dentro de los límites asignados en esta etapa.

Tabla 5-5: Rangos adoptados Factor Corrector - Diagramas de Dispersión

Factor Corrector	Valor inicial	Límite inferior	Límite Superior
FC_1	35.0	20.0	50.0
FC_2	1.0	0.5	2.0
FC_3	0.5	0.1	1.0
FC_4	5.0	1.0	10.0
FC_5	0.1	0.02	1.0
FC_6	10.0	1.0	20.0
FC_7	1.0	0.5	3.0
FC_8	100.0	50.0	200.0
FC_9	0.05	0.05	1.0

Tabla 5-6: Rangos adoptados Tanque Estado Inicial - Diagramas de Dispersión

Factor Corrector	Valor inicial	Límite inferior	Límite Superior
H_1	0.0	0.0	100.0
H_2	0.0	0.0	1.0
H_3	0.0	0.0	1000.0
H_4	1300.0	1200.0	1400.0
H_5	0.0	0.0	100.0

Tabla 5-7: Rangos adoptados Parámetros Fusión de Nieve - Diagramas de Dispersión

Factor Corrector	Valor inicial	Límite inferior	Límite Superior
M_f	4.0	2.0	4.0
M_f^*	8.0	6.0	8.0
T_b	1.5	-1.0	4.0

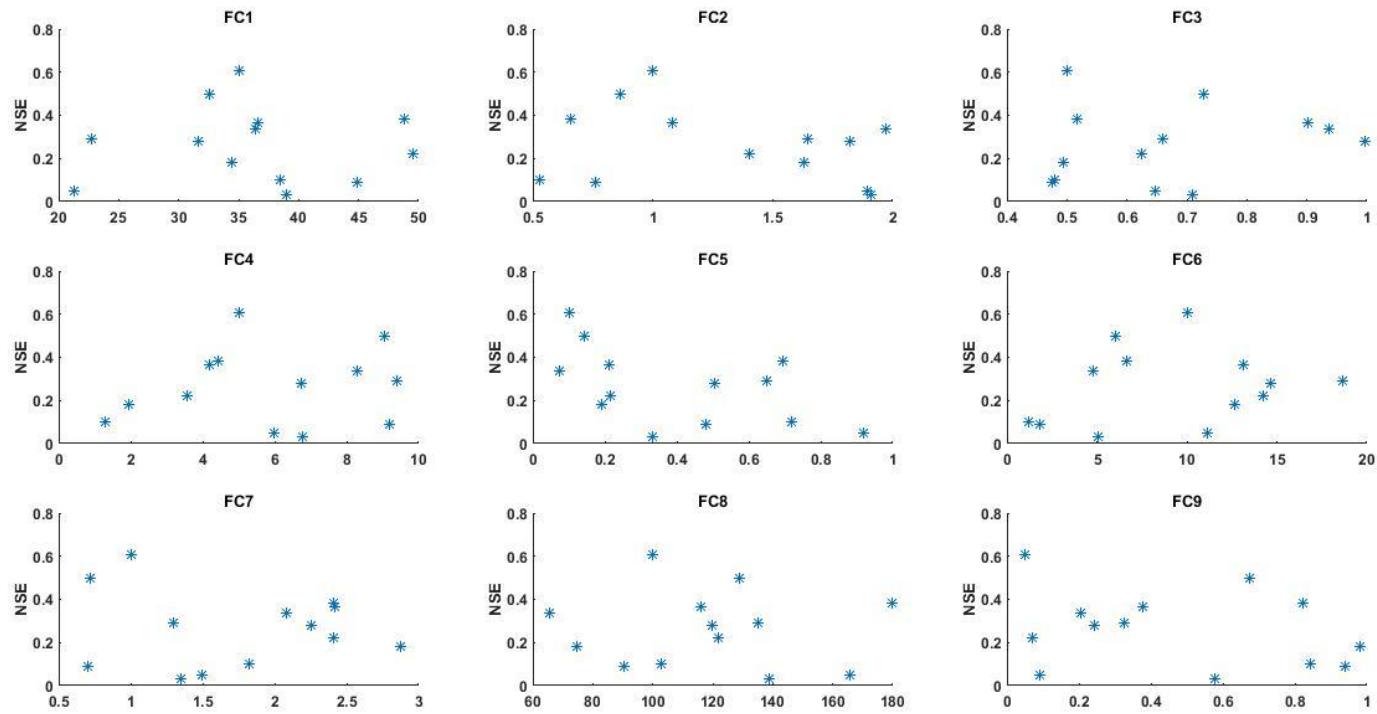


Figura 5-18: Diagramas de Dispersión - Factores Correctores

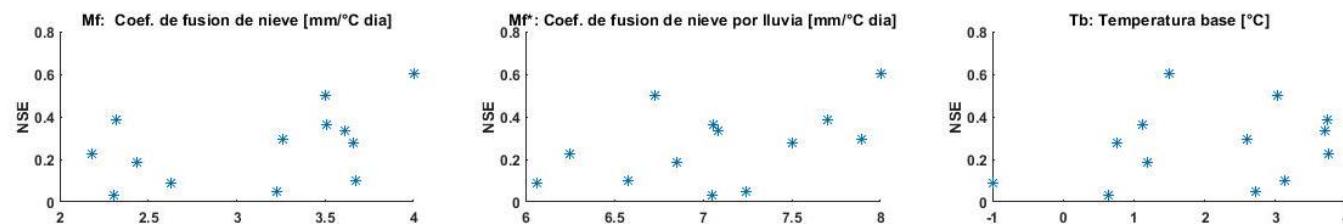


Figura 5-19: Diagramas de Dispersion - Parámetros Modelo de Fusión

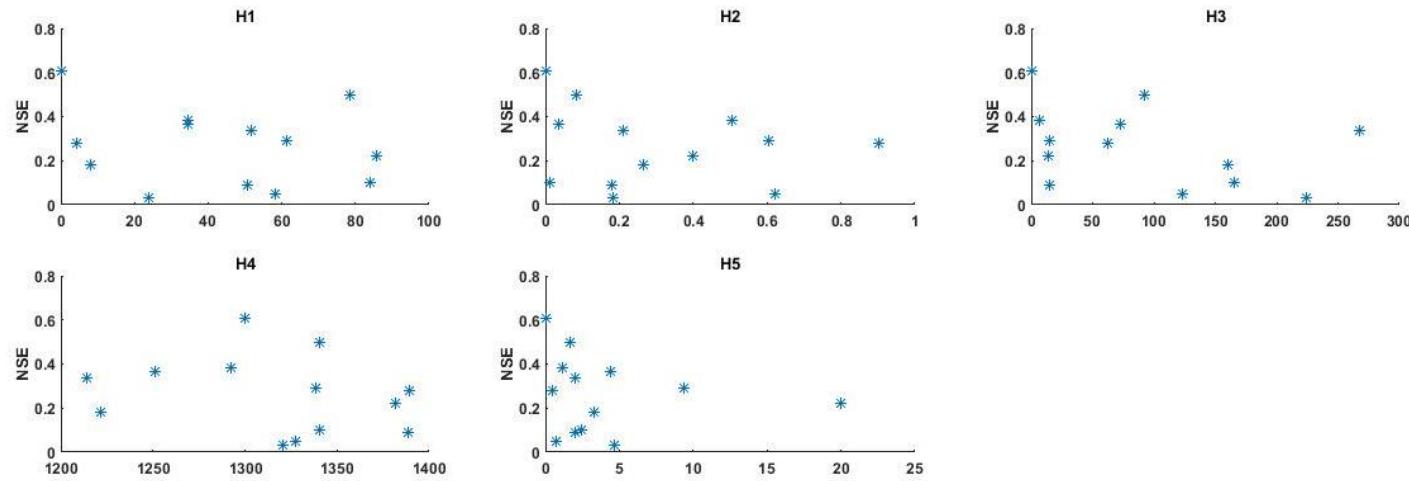


Figura 5-20: Diagramas de Dispersion - Tanques de Estado Inicial

Modelación Hidrológica: Etapa 3 – Optimización Global

A partir de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se adoptan los rangos que se muestran en la Tabla 5-8-Tabla 5-9-Tabla 5-10 para la variación de los factores correctores, tanques de estado inicial y parámetros de fusión de nieve, respectivamente. A modo de criterio, y considerando de los resultados de las gráficas de diagramas de dispersión, se adopta un valor constante de los parámetros de los tanques de estado inicial H_3-H_5 ; además de los coeficientes de fusión de nieve sin lluvia (M_f) y fusión de nieve con lluvia (M_f^*). Luego de efectuar 200 simulaciones hidrológicas con el algoritmo *SCE-UA*, se obtiene como resultado el óptimo global de los parámetros que se muestra en la Tabla 5-11.

En la Figura 5-21 se observan los hidrogramas de caudal observado vs simulado obtenido en la Etapa 3 (la simbología es equivalente a la presentada en la Figura 5-10), mientras que en la parte superior se muestra la precipitación media. Además, la Tabla 5-12 presenta la información sobre volumen total y caudal peak de los datos observados vs simulados, además de los resultados obtenidos de las FO consideradas en la modelación hidrológica.

Análisis Gráfico – Hidrograma

Al igual que en la Etapa 1, la producción de escorrentía simulada se ajusta satisfactoriamente al volumen observado, dada la similitud entre el hidrograma observado y simulado, y que es evidente sobretodo en los años 2010-2013-2014. Pero, en los años 2009-2012-2015 existen diferencias claras en el hidrograma durante el período estival, donde el modelo subestima el caudal observado de la cuenca. Dicha situación se repite para los valores de caudal peak, donde se observa que el caudal peak simulado es menor al observado, pero con una menor diferencia respecto de la modelación en la Etapa 1.

Análisis Cuantitativo - Resultados

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5-12, se observa que la producción de escorrentía simulada vs observada se encuentra satisfactoriamente balanceada (5251.6 Hm³ vs 5305.9 Hm³), siendo el volumen total simulado un 1.0% menor que la observada. En relación al caudal peak del período, para el día 04-06-2008 el caudal peak simulado es de 29.1 m³/s, que es un 67.84% menor al caudal observado para la fecha señalada. De igual forma, en otras fechas se repite la tendencia: el día 16-08-2008 el caudal simulado

es un 61.64% menor que el caudal observado; el día 06-09-2009 el caudal simulado es un 27.35% menor que el caudal observado; y el día 27-05-2012 el caudal simulado es un 44.24% menor que el caudal observado. Por otro lado, los resultados de las Funciones Objetivo (FO) presentan mejoras de la modelación hidrológica en términos de caudal, junto con un valor de SCA que mantiene su desempeño (tomando como referencia la modelación de la Etapa 1). Adicionalmente, se muestran los valores de las componentes del índice KGE , en donde se destaca que: el coeficiente r presenta una mejora (de 0.78 en la Etapa 1 a 0.82), entregando un buen ajuste de correlación lineal; el coeficiente α es de 0.88 (ligeramente mayor al valor de 0.84 en la Etapa 1), lo que indica un buen ajuste de la variabilidad; y el valor del coeficiente β adopta un valor casi unitario (prácticamente idéntico al de la Etapa 1), que advierte un sesgo entre datos simulados y observados de carácter óptimo.

Tabla 5-8: Rangos adoptados Factores Correctores - Optimización Global

Factor Corrector	Valor inicial	Límite inferior	Límite Superior
FC_1	35.0	30.0	40.0
FC_2	1.0	0.8	1.5
FC_3	0.5	0.1	0.8
FC_4	5.0	3.0	8.0
FC_5	0.1	0.05	0.25
FC_6	10.0	8.0	15.0
FC_7	1.0	0.8	2.5
FC_8	100.0	80.0	110.0
FC_9	0.05	0.03	0.1

Tabla 5-9: Rangos adoptados Tanques estado inicial - Optimización Global

Factor Corrector	Valor inicial	Límite inferior	Límite Superior
H_1	0.0	0.0	100.0
H_2	0.0	0.0	1.0
H_3	0.0	*	*
H_4	1300.0	1200.0	1400.0
H_5	0.0	*	*

Tabla 5-10: Rangos adoptados Parámetros de Fusión - Optimización Global

Factor Corrector	Valor inicial	Límite inferior	Límite Superior
M_f	4.0	*	*
M_f^*	8.0	*	*
T_b	1.5	0.0	4.0

Tabla 5-11: Valores parámetros – Modelación Hidrológica Etapa Optimización Global

Valores Óptimo Global					
Factor Corrector	Valor	Tanque Estado Inicial	Valor	Parámetros de fusión	Valor
FC_0	1.2	H_1	1.98	M_f	4.0
FC_1	35.14	H_2	0.29	M_f^*	8.0
FC_2	1.22	H_3	0.0	T_b	2.64
FC_3	0.24	H_4	1329.39		
FC_4	7.76	H_5	0.0		
FC_5	0.11	H_6	0.0		
FC_6	8.61				
FC_7	1.20				
FC_8	100.94				
FC_9	0.09				

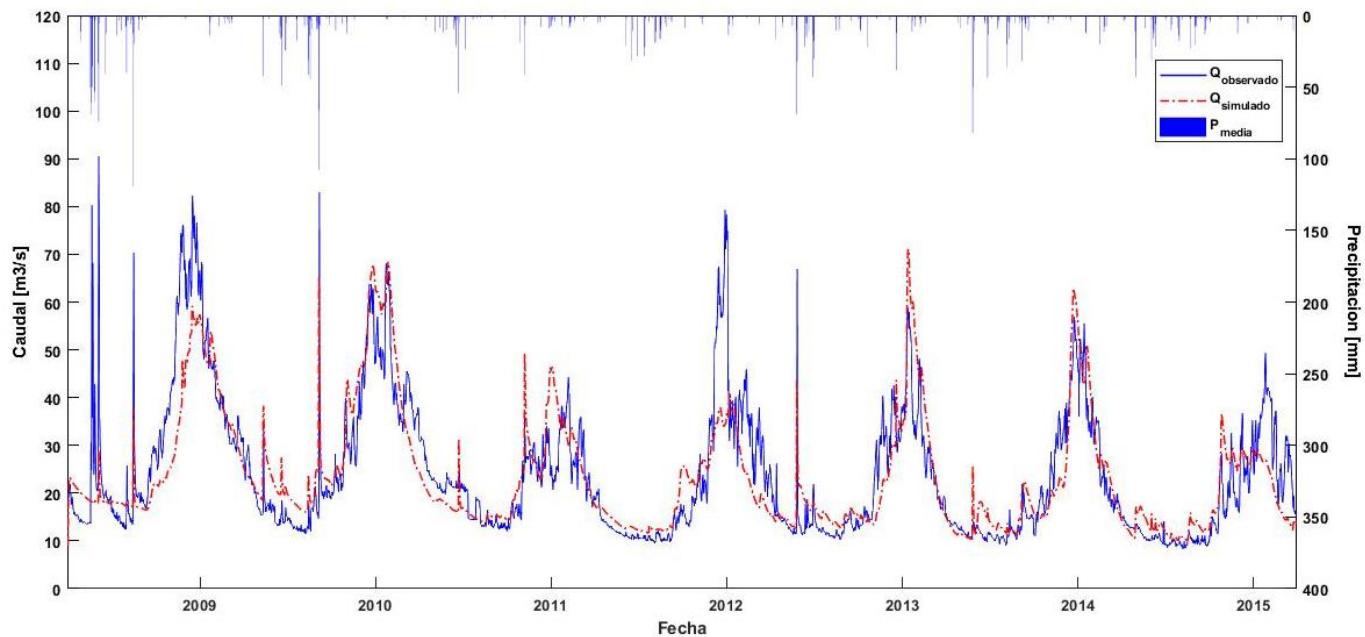


Figura 5-21: Hidrograma observado vs simulado – Modelación Hidrológica - Etapa 3

Tabla 5-12: Resultados Caudal Peak - Volumen - Modelación Hidrológica - Etapa 3

Caudal Peak y Volumen				Resultados F.O		
Medición	Observado	Simulado	Diferencia %	Variable	Índice	Valor
Volumen [hm ³]	5305.9	5251.6	-1.0%	Caudal	NSE	0.67
Caudal peak [m ³ /s]	90.5	71.1	-21.5%	SCA	NSE	0.44
				Caudal	KGE	0.78
Parámetros KGE						
				Caudal	r	0.82
				Caudal	α	0.88
				Caudal	β	0.99

Modelo Hidrológico – Flujos y Almacenamientos Medios

De igual manera que en la modelación hidrológica anterior, se presentan gráficamente los flujos de entrada (ver Figura 5-22), flujos de salida (Figura 5-23) y almacenamientos medios (ver Figura 5-24) entregados por el software TETIS. En primer lugar, respecto de los flujos de entrada: la precipitación (X_{01}) y la lluvia directa (X_{06}) tienen igual magnitud durante todo el período; el excedente (X_{02}) vs la infiltración (X_{03}) no coinciden en su magnitud a partir de un umbral de precipitación media aproximada de 70 mm (donde el excedente es mayor a la infiltración); y la percolación (X_{04}) vs las pérdidas subterráneas (X_{05}) coinciden en su valor para cada paso de tiempo (dicho par de variables presentan magnitudes bajas no mayores a 2 mm). En segundo lugar, acerca de los flujos de salida: la fusión de nieve (Y_{00}) y el interflujo (Y_{03}) tienen un comportamiento estacional con máximos anuales en el período de verano; la escorrentía directa (Y_{02}) muestra que en los días con tormentas adopta valores no nulos y menores a los 4 mm; y el flujo subterráneo disminuye progresivamente desde un valor de 1.2 mm hasta un valor de 0.12 mm al finalizar el período. En tercer lugar, en cuanto a los almacenamientos: el volumen de nieve (H_{00}) presenta variaciones estacionales (muy similar al comportamiento de la Etapa 1); el almacenamiento en el acuífero (H_{04}) comienza con un valor de 1300 mm para ir descendiendo hasta un valor de 177.8 mm al finalizar; el almacenamiento capilar (H_{01}) aumenta gradualmente desde un valor nulo hasta un valor de 1163 mm; por último, el almacenamiento subsuperficial (H_{03}) adopta valores bajos en comparación con las otras variables, junto con máximos locales en el período estival; la variable de almacenamiento en las hojas (H_{06}) tiene un valor constante igual a 0.38 mm; el volumen de almacenamiento en los cauces (H_{05}) tiene una baja magnitud generalmente menor a H_{06} , con picos locales en los días de precipitación; y la variable

(H_{02}) es nula durante todo el período, a excepción de los días con precipitaciones de alto impacto donde presenta aumentos diferenciales. Por otra parte, cabe señalar que las variables no mencionadas poseen valores nulos durante todo el período, tal como se puede apreciar en las gráficas.

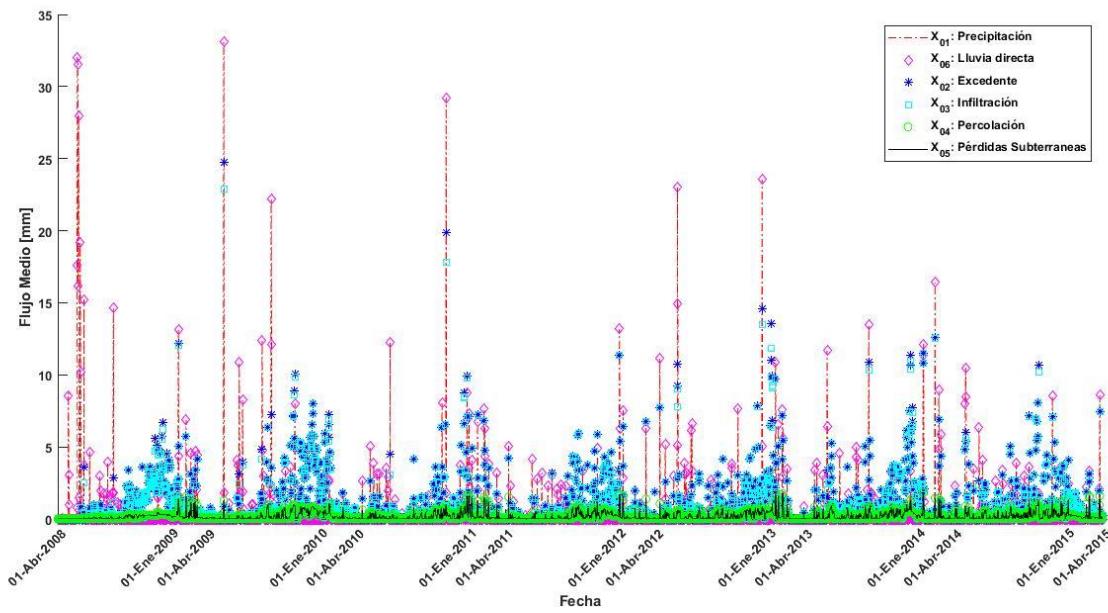
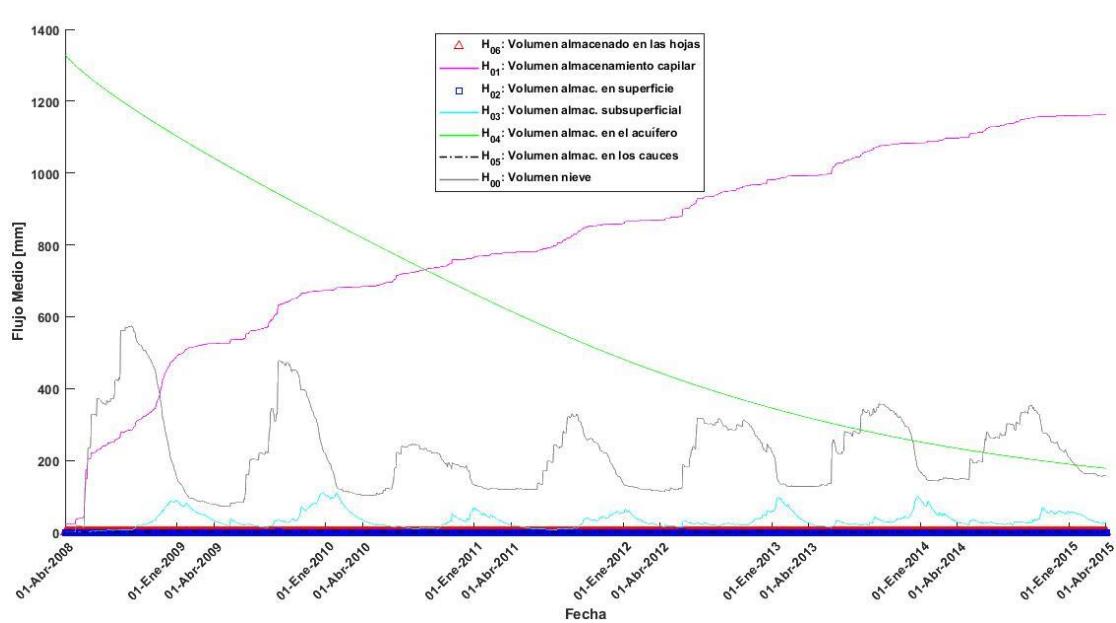
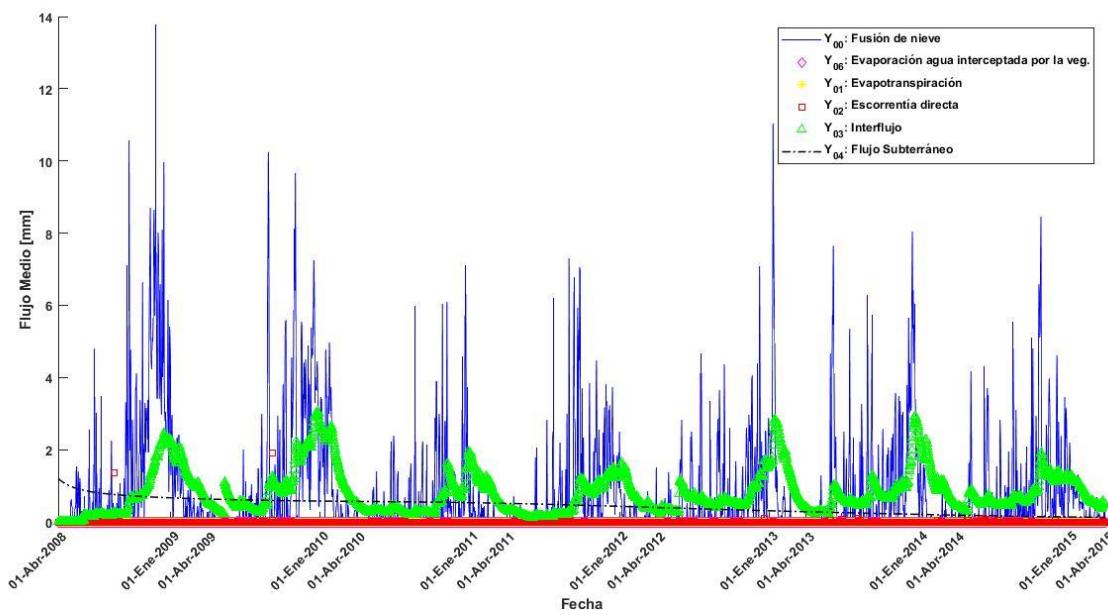


Figura 5-22: X - Flujos de Entrada – Modelación Etapa 3



5.3.2 Período de Validación

Modelación Hidrológica: Etapa 4 – Validación

En la Figura 5-25 se observan los hidrogramas de caudal observado vs simulado para el período de Validación 2015-2018, mientras que en la parte superior se muestra la precipitación media (la simbología es equivalente a la presentada en la Figura 5-10). Además, la Tabla 5-13 presenta la información sobre volumen total y caudal peak de los datos observados vs simulados, además de los resultados obtenidos de las FO consideradas en la modelación hidrológica.

Análisis Gráfico – Hidrograma

La modelación hidrológica muestra que el hidrograma simulado se encuentra por sobre el observado durante la mayor parte del período (notar la gráfica para el año 2017). Asimismo, para la mayor parte de los eventos de precipitación, el modelo hidrológico no responde con aumentos locales en el caudal simulado (advertir que eventos de precipitación del año 2017 conducen a peaks locales del hidrograma muy suaves o inexistentes). A pesar de ello, existe un evento de precipitación durante el año 2016 que conduce a un valor peak simulado que sobreestima en gran medida el caudal observado de la cuenca.

Análisis Cuantitativo - Resultados

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5-13, se observa que la producción de escorrentía simulada sobreestima el volumen observado (2621.5 Hm³ vs 2130.0 Hm³), siendo el volumen simulado un 23.1% mayor. En relación al caudal peak del período, para el día 23-01-2016 el caudal peak simulado es de 45.63 m³/s, que es un 36.81% menor al caudal observado para la fecha señalada. Pero, en la fecha 16-04-2016 el caudal simulado es un 524.3% mayor al caudal observado (203.5 m³/s vs 32.6 m³/s), lo que indica una sobreestimación considerable en este evento por parte del modelo (la explicación a esto se entrega en la sección 5.3.3). Dicho esto, de un total de 1097 días del período de Validación, en 853 datos el caudal simulado es mayor al observado, lo que corresponde a un 77.76%. Por otra parte, los resultados de las FO reflejan un empeoramiento de todos los índices de desempeño, en donde el índice *KGE* se degrada en menor medida que el índice *NSE*. Además, los parámetros del índice *KGE* muestran que: el coeficiente *r*

pasa de 0.82 a 0.65 (con respecto a la Etapa 3), entregando un ajuste de correlación lineal medianamente aceptable; el coeficiente α es de 1.14, lo que indica una variabilidad mayor en los datos simulados; y el valor del coeficiente β adopta un valor de 1.23, que advierte un sesgo aceptable pero no satisfactorio.

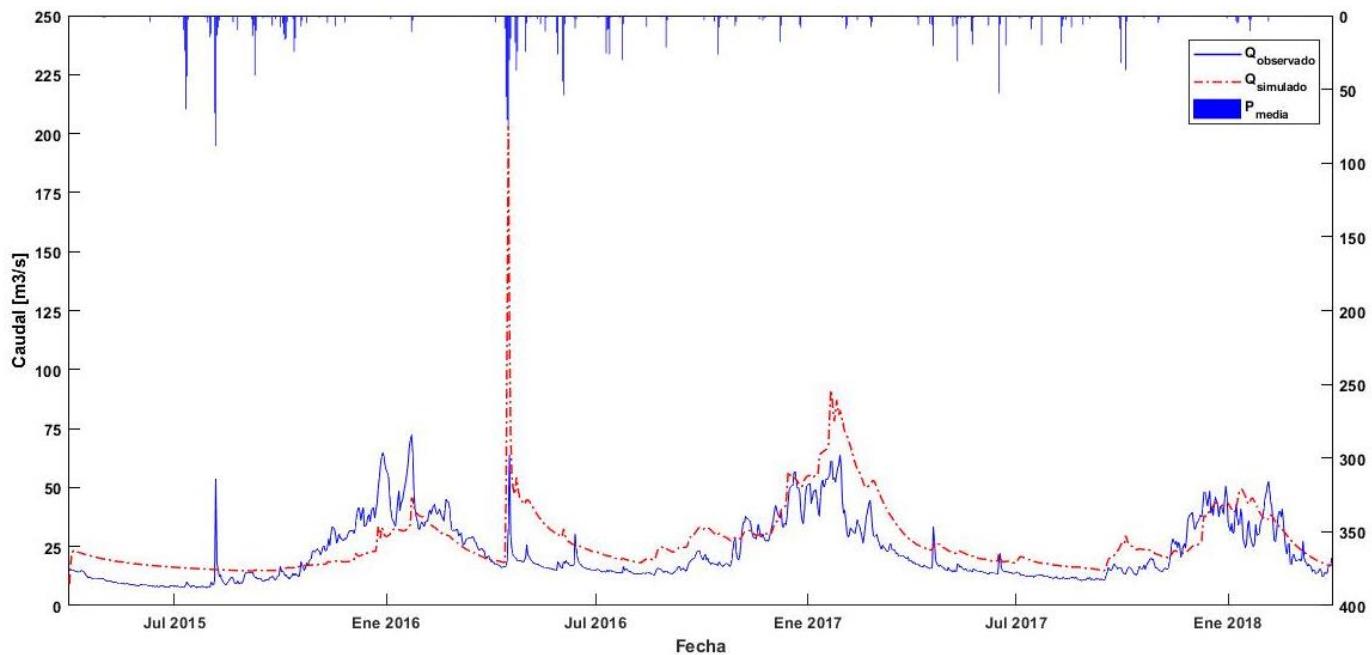


Figura 5-25: Hidrograma observado vs simulado – Modelación Hidrológica – Etapa 4 - Validación

Tabla 5-13: Resultados Caudal Peak - Volumen - Modelación Hidrológica Etapa 4 – Validación

Caudal Peak y Volumen				Resultados F.O		
Medición	Observado	Simulado	Diferencia %	Variable	Índice	Valor
Volumen [hm ³]	2130.0	2621.5	23.08%	Caudal	NSE	0.01
Caudal peak [m ³ /s]	72.2	203.5	181.9%	SCA	NSE	0.21
				Caudal	KGE	0.56
Parámetros KGE						
				Caudal	r	0.65
				Caudal	α	1.14
				Caudal	β	1.23

Modelo Hidrológico – Fluxos y Almacenamientos Medios

De igual forma que en el período de Calibración, se presentan gráficamente los fluxos de entrada (ver Figura 5-26), fluxos de salida (ver Figura 5-27) y almacenamientos medios (ver Figura 5-28) entregados por el software TETIS. Primero, respecto de los fluxos de entrada: la precipitación (X_{01}) y la lluvia directa (X_{06}) tienen igual magnitud durante la mayor parte del período (en solo 32 datos no coinciden, lo que equivale a un 2.9% del total); el excedente (X_{02}) vs la infiltración (X_{03}) coinciden en la mayoría de los datos (en solo 134 datos no coincide, que corresponde a un 12.2% del total); y la percolación (X_{04}) vs las pérdidas subterráneas (X_{05}) son iguales en la totalidad de los datos (dicho par de variables presentan magnitudes bajas no mayores a 2 mm). Segundo, acerca de los fluxos de entrada, el comportamiento en todas las variables es idéntico al de la Etapa 3. De modo similar, las variables de los tanques de almacenamiento tienen la misma conducta que en la Etapa 3.

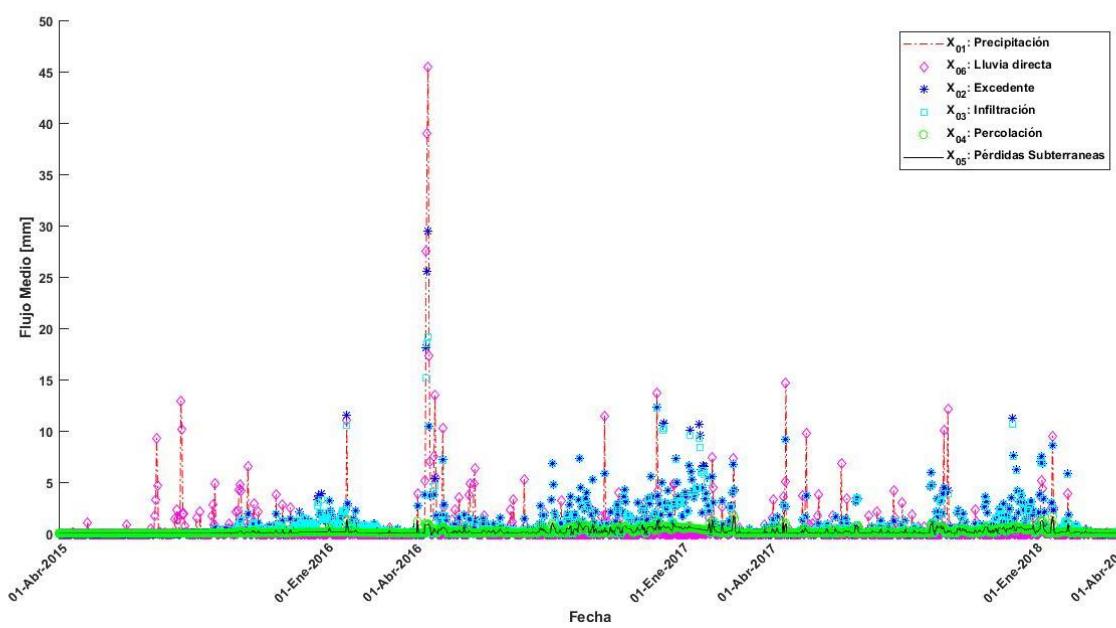


Figura 5-26: X - Fluxos de Entrada – Modelación Etapa 4 - Validación

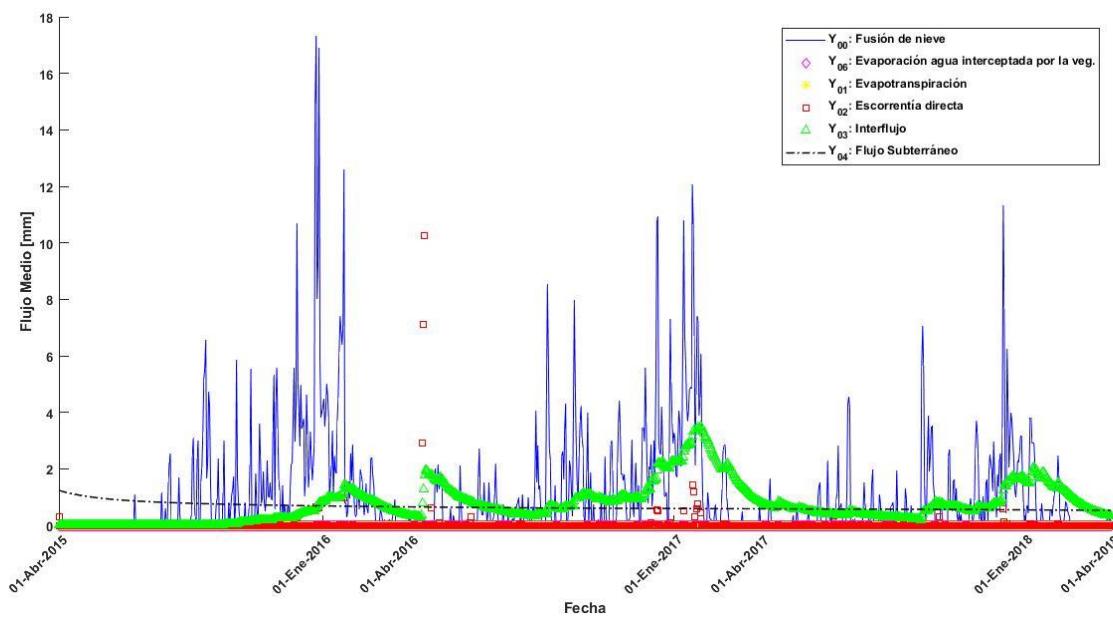


Figura 5-27: Y - Flujos de Salida – Modelación Etapa 4 - Validación

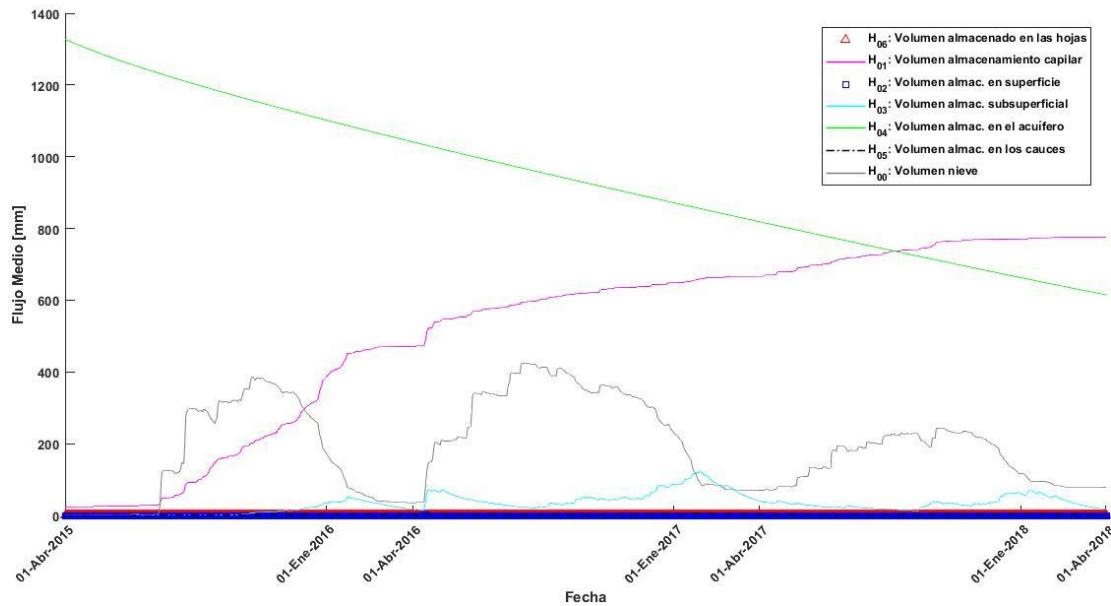


Figura 5-28: J - Almacenamientos Medios - Modelación Etapa 4 - Validación

5.3.3 Discusión de Resultados

Producción de escorrentía – Procesos Físicos

Con el objeto de detectar los procesos físicos que intervienen en la producción de escorrentía, se presenta un resumen de las variables de flujos y almacenamientos medios (que corresponden a las variables del diagrama de tanques de producción de escorrentía en la Figura 2-2) que participan de las modelaciones efectuadas. Los resultados se muestran en la Tabla 5-14 (flujos de salida), Tabla 5-15 (almacenamientos medios) y Tabla 5-16 (flujos de entrada). Cabe señalar que las variables no presentadas tienen un valor nulo durante todo el período de modelación.

Tabla 5-14: Flujos de Salida - Variable

Flujos de salida	Nombre
Y_{00}	Fusión de Nieve
Y_{02}	Escorrentía Directa
Y_{03}	Interflujo
Y_{04}	Flujo Subterráneo

Tabla 5-15: Almacenamientos Medios - Variable

Almacenamientos	Nombre
H_{00}	Volumen de Nieve
H_{01}	Volumen de Alm. Capilar
H_{02}	Volumen de Alm. Superficie
H_{03}	Volumen de Alm. Subsuperficial
H_{04}	Volumen de Alm. acuífero
H_{05}	Volumen de Alm. Cauces
H_{06}	Volumen Alm. Hojas

Tabla 5-16: Flujos de entrada - Variable

Flujos de entrada	Nombre
X_{01}	Precipitación
X_{06}	Lluvia Directa
X_{02}	Excedente
X_{03}	Infiltración
X_{04}	Percolación
X_{05}	Pérdidas Subterráneas

Se observa que las variables de flujo de salida son: Fusión de Nieve (Y_{00}), Escorrentía Directa (Y_{02}), Interflujo (Y_{03}) y Flujo Subterráneo (Y_{04}). Además, los almacenamientos medios involucrados son: Volumen de Nieve (H_{00}), Volumen de Almacenamiento Capilar (H_{01}), Volumen de Almacenamiento Subsuperficial (H_{03}), Volumen de Almacenamiento Acuífero (H_{04}), y en menor medida el Volumen de Almacenamiento en Superficie (H_{02}), junto con Volumen almacenado en las hojas (H_{06}) y el Volumen almacenado en los cauces (H_{05}). Y por último, los flujos de entrada son: Precipitación (X_{01}), Lluvia Directa (X_{06}), Excedente (X_{02}), Infiltración (X_{03}), Percolación (X_{04}) y Pérdidas Subterráneas (X_{05}).

Los resultados muestran que todos los procesos físicos señalados en la sección 2.2.1 participan de la producción de escorrentía, a excepción de la Intercepción y Evapotranspiración (advertir que las pérdidas por evapotranspiración Y_{01} y evaporación de agua interceptada por la vegetación Y_{06} son nulas durante todo el período, y en todas las modelaciones). La evaporación producto de la intercepción en una cuenca andina de gran superficie (como la cuenca del Río Colorado) y en la escala de tiempo empleada no debiese ser despreciable, por ende, carece de sentido físico. De igual manera, la evapotranspiración para la escala de tiempo y para cuencas grandes puede llegar a ser importante, por ende, tampoco tiene sentido físico (GIHMA, 2020).

Parámetros del Modelo Hidrológico

Los parámetros del modelo hidrológico TETIS modifican las variables (flujos de entrada, flujos de salida o almacenamientos) que participan de la producción de escorrentía. Por ello, se revisarán cuáles de los siguientes aspectos son modificados ante una variación individual de los parámetros (si la variación consiste en un aumento o disminución dependerá de cada caso, y puede ser consultado en *Descripción del*

(Modelo Conceptual Distribuido de Simulación Hidrológica TETIS): la cobertura de nieve resultante SCA, y el hidrograma resultante. Para el hidrograma se abarcan los siguientes criterios que se enuncian a continuación:

- > Volumen: Aumento/Disminución en el volumen total del hidrograma simulado.
- > Forma del Hidrograma: Se logra una disminución del hidrograma, que resulta ser más plano y con caudales peak más suaves. O, por el contrario, un aumento del hidrograma que resulta en caudales peak más pronunciados y variaciones más fuertes.
- > Tiempo al peak: Adelanto/Retraso del tiempo al peak de caudal del hidrograma.

Parámetros - Factores Correctores

En la Tabla 5-17 se muestra un resumen donde se señalan cuáles de los criterios mencionados sobre el hidrograma se ven afectados por la variación individual de los factores correctores del modelo TETIS. Dicha tabla incluye el tanque de producción de escorrentía en donde interviene cada factor corrector para una mejor comprensión. En cuanto a la cobertura de nieve SCA, los factores correctores no modifican su valor debido a que no participan en el tanque T_0 de manto de nieve. Por otra parte, el factor corrector FC_0 no participa de ningún tanque de producción, ya que reescalas al hidrograma de salida para ajustarse a un valor de caudal máximo. A excepción de FC_1-FC_2 , todos los parámetros conducen a una modificación de la forma del hidrograma, ya que intervienen en los tanques que aportan a la escorrentía total simulada del modelo, mientras que los parámetros señalados aumentan/disminuyen las pérdidas de agua en el modelo. Asimismo, la variación del parámetro FC_9 solo afecta a la ecuación de continuidad en la formulación de la Onda Cinemática Geomorfológica (OCG) incorporada en el modelo, y es el único parámetro que afecta el tiempo al peak de las crecidas (GIHMA, 2020).

Tabla 5-17: Cambios en Resultados - Factores Correctores

FC	Tanque	Criterio Hidrograma			Criterio SCA
		Volumen	Forma del Hidrograma	Tiempo al peak	
FC_0	N.A		x		
FC_1	T_1	x			
FC_2	T_2	x			
FC_3	T_2		x		
FC_4	T_2		x		
FC_5	T_3		x		
FC_6	T_3		x		
FC_7	T_4	x	x		
FC_8	T_4		x		
FC_9	N.A		x	x	

Es claro que los hidrogramas resultantes de las simulaciones hidrológicas están fuertemente influenciados por los valores adoptados de los factores correctores. Pese a ello, en algunos casos, el impacto que tiene en el hidrograma la variación de los factores correctores dependerá de la escala espacial y temporal de la modelación, ya que tienen un límite de acuerdo a su definición (GIHMA, 2020).

Parámetros – Tanques de Estado Inicial

Los estados iniciales de los tanques de almacenamiento (que se muestran en la tabla adjunta) afectan en su totalidad al volumen simulado, ya que intervienen en la producción de escorrentía del modelo TETIS. Esto es, afectan a las variables de almacenamientos medios H_{01} - H_{02} - H_{03} - H_{04} - H_{05} - H_{06} en su estado inicial que fueron presentadas gráficamente en la sección 5.3.1-5.3.2. Al igual que los factores correctores, la variación de estos parámetros no afecta a la acumulación de cobertura de nieve SCA, ya que no intervienen en el tanque T_0 (ver Tabla 5-18). Por otro lado, para las modelaciones efectuadas, y a modo de simplificación, se trabajó con una sola región geomorfológicamente homogénea. Esto implica que en todas las celdas que componen la cuenca los valores iniciales son los mismos (GIHMA, 2020).

Tabla 5-18: Cambios en Resultados - Estado Inicial Tanques de Almacenamiento

Estado Inicial Tanque	Tanque	Criterio Hidrograma			Criterio SCA
		Volumen	Forma del Hidrograma	Tiempo al peak	
H_1	T_1	x			
H_2	T_2	x			
H_3	T_3	x			
H_4	T_4	x			
H_5	T_5	x			
H_6	T_6	x			

Parámetros – Parámetros de Fusión de Nieve

La incidencia que tienen los parámetros de fusión de nieve en el modelo TETIS tiene lugar en el tanque de manto de nieve T_0 . Es decir, se refleja en las variables: tasa de fusión de nieve (Y_0) y en el nivel del tanque de manto de nieve (H_{00}) que fueron presentadas gráficamente en la sección 5.3.1-5.3.2. Lo anterior se traduce en un aumento/disminución del volumen del hidrograma simulado. Además, estos parámetros son los únicos que afectan a la acumulación de cobertura de nieve *SCA* (ver Tabla 5-19).

Tabla 5-19: Cambios en Resultados - Parámetros de Fusión de Nieve

Parámetros Fusión de Nieve	Tanque	Criterio Hidrograma			Criterio SCA
		Volumen	Forma del Hidrograma	Tiempo al peak	
M_f	T_0	x			x
M_f^*	T_0	x			x
T_b	T_0	x			x

Comentarios Finales Modelación Hidrológica

Considerando lo expuesto previamente sobre los parámetros del modelo hidrológico TETIS, se presentarán a continuación comentarios finales sobre las modelaciones hidrológicas presentadas en 5.3.1-5.3.2, con un enfoque en el hidrograma resultante y en las series de cobertura de nieve SCA. Para esto, se adjuntan a continuación las tablas resúmenes con los parámetros obtenidos (ver Tabla 5-20-Tabla 5-21-Tabla 5-22). Además, se adjuntan rangos o umbrales de algunos parámetros sugeridos en la *Descripción del Modelo Conceptual Distribuido de Simulación Hidrológica TETIS*.

Tabla 5-20: Resumen Factores Correctores

Factor Corrector	Umbral o Rango	Modelación Hidrológica		
		Valores Iniciales	Etapa 1	Etapa 3
FC_0	1.0	1.0	1.2	1.2
FC_1	1.0	1.0	35.0	35.14
FC_2	1.0	1.0	1.0	1.22
FC_3	0.2	0.2	0.5	0.24
FC_4	[0.01–10.0]	1.0	5.0	7.76
FC_5	0.2	0.4	0.1	0.11
FC_6	[0.001–100000]	10.0	10.0	8.61
FC_7	1.0	1.0	1.0	1.20
FC_8	[0.001–100000]	200.0	100.0	100.94
FC_9	1.0	1.0	0.05	0.09

Tabla 5-21: Resumen Estado Inicial Tanques

Estado Inicial Tanque	Umbral o Rango	Modelación Hidrológica		
		Valores Iniciales	Etapa 1	Etapa 3
H_1	[0 – 100]	0.0	0.0	1.98
H_2	-	0.0	0.0	0.29
H_3	-	0.0	0.0	0.0
H_4	-	0.0	1300.0	1329.39
H_5	[0 – 1000]	0.0	0.0	0.0
H_6	[0 – 100]	0.0	0.0	0.0

Tabla 5-22: Resumen Parámetros de Fusión

Parámetros Fusión de Nieve	Umbral o Rango	Modelación Hidrológica		
		Valores Iniciales	Etapa 1	Etapa 3
M_f	[0 – 100]	1.0	4.0	4.0
M_f^*	-	1.0	8.0	8.0
T_b	[-2.0 – 4.0]	1.0	1.5	2.64

Hidrograma - Modelación Valores Iniciales – Período de Calibración

En el análisis del hidrograma presentado en la sección 5.3.1 se señaló que el hidrograma simulado entrega un volumen total considerablemente inferior al observado (2696.5 Hm^3 vs 5305.9 Hm^3). Además, se indicó que responde con caudales peak elevados para los eventos de tormenta de alto impacto (sobre el umbral de los 50 mm), mientras que para los eventos restantes el hidrograma es plano y tiene incrementos suaves. Asimismo, se insinuó que no presenta mayores cambios estacionales de caudal por fusión de nieve. La simulación hidrológica responde de esta manera debido a los factores enunciados a continuación:

- > En primer lugar, el FC_0 con un valor relativo menor igual a 1.0 se traduce en un hidrograma resultante disminuido, ya que no existe amplificación (GIHMA, 2020).
- > En segundo lugar, los elevados peaks de caudal en *tormentas de alto impacto* se deben al efecto combinado de: elevadas entradas por precipitación X_{06} (sobre el umbral de los 50 mm); un valor de 0.2 del factor FC_3 implica una baja velocidad de infiltración a estratos más profundos, lo que aumenta los peaks de caudal y produce variaciones más fuertes; y un valor de 1.0 del factor FC_9 aumenta la velocidad de flujo, lo que implica respuestas más rápidas y por lo tanto caudales peak mayores. Lo anterior conlleva a una diferencia entre el excedente X_{06} y la infiltración X_{02} de forma exclusiva en tormentas de alta intensidad, que es posible de apreciar en la gráfica de flujos de entrada (en caso contrario adoptan la misma magnitud, y por ende no hay entrada al tanque de almacenamiento superficial T_2). Con la excepción del factor FC_9 , los factores mencionados intervienen en la escorrentía directa (respuesta rápida) del modelo (GIHMA, 2020).
- > En tercer lugar, el hidrograma plano con peaks suaves responde a: un valor ligeramente mayor al umbral de 0.2 de FC_5 aumenta la velocidad de percolación, disminuyendo el hidrograma; un valor bajo del FC_6 igual a 10.0 (notar rango) disminuye la tasa de salida del interflujo Y_{03} , disminuyendo

el hidrograma y los caudales peak. Asimismo, el valor de 200.0 del factor FC_8 se refleja igualmente en una baja tasa de salida de flujo base Y_{04} , y por ello en un hidrograma más plano y con una respuesta más lenta. Los parámetros señalados intervienen en la componente de respuesta intermedia (interflujo) y respuesta lenta (flujo base) (GIHMA, 2020).

- > En cuarto lugar, los parámetros de nieve adoptados por defecto reflejan una baja (casi imperceptible) fusión de nieve en la cuenca. Esto se refleja tanto en el hidrograma de escorrentía (notar que los incrementos por fusión de nieve en el período estival son prácticamente inexistentes) y en la gráfica de la variable H_{00} (asociada al tanque T_0 de manto de nieve), donde se observa un claro “escalonamiento” que representa la acumulación de nieve permanente en la cuenca. Además, la baja fusión de nieve es la principal causa de la baja producción de escorrentía simulado que entrega este modelo.
- > En quinto lugar, el valor de FC_1 igual a 1.0 (igual al valor sugerido) implica una capacidad de retención baja en el tanque T_1 de almacenamiento estático, lo que conduce a altos aportes de agua al hidrograma simulado. Esto se evidencia en que la variable de almacenamiento capilar H_{01} crece rápidamente hasta estabilizarse en un valor aproximado de 34.7mm. A partir de dicho valor, los aportes de agua se derivan en su totalidad a los tanques inferiores de almacenamiento superficial (T_2), almacenamiento gravitacional (T_3) y acuífero (T_4).

Hidrograma - Modelación Etapa 1 – Modelación Etapa 3 – Período Calibración

Dada la similitud considerable entre ambos hidrogramas, se entregarán comentarios comunes sobre la Etapa 1 y Etapa 3, además de destacar las ligeras diferencias entre ambos modelos. En ambos casos la producción de escorrentía simulada es bastante cercana a la observada: para la Etapa 1 es un 0.7% mayor a lo observado, mientras que en la Etapa 3 es un 1.0% menor a lo observado. Además, el hidrograma se ajusta satisfactoriamente en los años 2010-2013-2014, pero con diferencias claras durante el período estival de los años 2009-2012-2015 (el hidrograma simulado subestima el caudal observado de la cuenca). Las simulaciones hidrológicas responden de esta manera debido a los factores enunciados a continuación:

- > En primer lugar, el FC_0 con un valor igual a 1.2 se traduce en un hidrograma resultante aumentado (GIHMA, 2020). Este valor es común para ambas modelaciones, por ende, no explica las diferencias.
- > En segundo lugar, los peak de caudal simulado inferiores al caudal peak observado en eventos de *tormentas de alto impacto* (característica común en las dos etapas) se deben al efecto combinado de: elevadas entradas por precipitación X_{06} ; un valor de 0.5 del factor FC_3 en el caso de la Etapa 1 que implica una velocidad de infiltración relativa mayor, lo que disminuye los peaks de caudal y produce variaciones más lentas; un valor de FC_4 de 7.76 en la Etapa 3 amplifica en mayor medida la salida de escorrentía directa Y_{02} con respecto a la Etapa 1; y en ambos casos, los valores de FC_9 menores a 1.0 (0.05 y 0.09) se traducen en caudales peak menores y un mayor tiempo al peak (GIHMA, 2020). Lo anterior contribuye a que el caudal peak simulado en la Etapa 3 sea ligeramente mayor para dichos eventos y más cercano a caudal peak observado.
- > En tercer lugar, los parámetros de nieve de ambos modelos son idénticos, con la excepción de la temperatura base T_b , que es mayor en el caso de la Etapa 3. La temperatura base T_b de 1.5°C en el caso de la Etapa 1 favorece una mayor fusión de nieve en comparación con la Etapa 3 (notar diferencias en magnitud de la variable Y_{00} de las gráficas), y que además explican la mayor producción de escorrentía (volumen) en el caso de la Etapa 1. Por otra parte, las diferencias en el hidrograma que se aprecian en los años 2009-2012-2015 para el período estival se deben a dos posibles motivos: en primer lugar, a posibles diferencias entre las series de datos de temperatura media y/o precipitación media (CR2MET) con los datos reales de la cuenca en dichos años, generando en consecuencia diferencias sustanciales en la fusión de nieve; y en segundo lugar, el uso de coeficientes de fusión de nieve ($M_f - M_f^*$) constantes e invariantes en el tiempo pueden no estar reproduciendo satisfactoriamente la fusión de nieve en la cuenca, lo que sugiere el empleo de un modelo de fusión distribuido en el espacio con coeficientes de fusión variables (GIHMA, 2020). En todo caso, la elección de los parámetros de coeficientes de fusión ($M_f - M_f^*$) se basan en los valores recomendados por la literatura (Hock, 2003), y por ello tienen sentido físico.
- > En cuarto lugar, cabe señalar que ambos modelos tienen valores similares de FC_1 igual o cercano a 35.0 (bastante mayor al valor de 1.0 sugerido), que conducen a una excesiva (y no deseable) capacidad de almacenamiento en el tanque T_1 . Esto se refleja en un crecimiento sistemático de la variable de almacenamiento capilar H_{01} al transcurrir el período de modelación (consultar Figura

5-17 y Figura 5-24). En este contexto, durante el año 2008, los eventos de tormentas contribuyen mayormente a una recarga rápida del tanque T_1 , que comienza con un bajo valor inicial H_1 de 0% y 1.98% para la Etapa 1 y Etapa 3, respectivamente. Como consecuencia, existen menores aportes a los tanques inferiores $T_2-T_3-T_4$, lo que explica la incapacidad y/o subestimación por parte del modelo para reproducir peaks de caudal en especial al inicio del período (GIHMA, 2020).

- En quinto lugar, para obtener el volumen de flujo base en el hidrograma simulado, fue necesario comenzar con una alta magnitud inicial del acuífero T_4 , reflejado en la variable H_4 con un valor igual o cercano a 1300mm en la Etapa 1 y Etapa 3, respectivamente. Paralelamente, la subestimación en las conductividades asignadas por percolación K_p repercuten en una baja recarga del acuífero (menor a la salida por flujo subterráneo Y_{04}), provocando en respuesta un descenso sistemático (y no deseable) del nivel del acuífero al transcurrir el período (consultar variable H_{04} en Figura 5-17 y Figura 5-24).
- En sexto lugar, el adoptar una sola región geomorfológicamente homogénea puede estar incidiendo en una degradación de la respuesta del modelo: esto se debe a que la definición de cárcavas y cauces adoptada puede distar considerablemente de la situación real. Cabe señalar que dicho motivo influye tanto en el Período de Calibración como en el Período de Validación.

Hidrograma - Modelación Etapa 4 – Período de Validación

En el análisis del hidrograma presentado en la sección 5.3.2 se señaló que la modelación entrega un volumen total mayor al observado (2621.5 Hm³ vs 2130.0 Hm³). Además, se indicó que en la mayor parte de los eventos de precipitación el hidrograma responde con caudales peak locales muy suaves o inexistentes (hidrograma plano), pero con un evento aislado el año 2016 que conduce a un elevado caudal peak de 203.5 m³/s. Dado que los parámetros empleados en esta modelación son los de la Etapa 3 del Período de Calibración, el análisis de los parámetros de entrada no cambia. A continuación, se entregan comentarios de la simulación hidrológica:

- En primer lugar, el proceso calibración fue efectuado en el período 2008-2015, donde el régimen de lluvias es significativo, en especial en los años 2008-2009, lo que conduce a un hidrograma observado mayor. Pero, en el período 2015-2018, el régimen de precipitaciones disminuye significativamente a partir del año 2016 (período de sequía), provocando una disminución del

hidrograma observado. Por ello, la modelación hidrológica con los parámetros calibrados en el Período de Validación no tiene una buena respuesta.

- En segundo lugar, tomando en consideración el punto anterior, el valor del parámetro FC_3 igual a 0.24 resulta en una alta velocidad de infiltración: esto se traduce en que los flujos de salida por escorrentía directa Y_{02} disminuyen, llegando a ser muy escasos para esta modelación. Igualmente, debido a posibles diferencias entre las series de precipitación media CR2MET con los datos reales de la cuenca, se pueden provocar diferencias con la escorrentía observada (revisar Anexo III).
- En tercer lugar, la tormenta ocurrida el 16-04-2016 consta de 3 días consecutivos con precipitación media sobre los 55 mm (en el día 16-04-2016 la precipitación media alcanza los 74 mm), en donde efectivamente se logra un aporte de escorrentía directa que conduce a un valor elevado de 203.5 m³/s. En particular, este peak repentino provoca una degradación importante en la variabilidad α y en el sesgo β simulado vs observado de la modelación hidrológica.
- En tercer lugar, debido a que el valor de FC_1 se mantiene, el análisis señalado en la Etapa 1 y Etapa 3 del Período de Calibración también aplica para el Período de Validación.
- En cuarto lugar, el análisis sobre la producción de flujo base reflejado en el tanque del acuífero T_4 y la variable H_{04} es equivalente al mencionado en la Etapa 1 y Etapa 3 para el Período de Calibración. En cuanto a los tanques de producción de escorrentía, es altamente recomendable aplicar el concepto de continuidad en la modelación hidrológica. Esto es, el empleo de los niveles obtenidos al finalizar el Período de Calibración como niveles iniciales en la Etapa de Validación, podría mejorar considerablemente la respuesta hidrológica.

Desempeño Cobertura de Nieve (SCA)

En la Figura 5-29-Figura 5-30 se muestran las series de SCA simuladas vs observadas para el Período de Calibración 2008-2015 y Período de Validación 2015-2018, respectivamente. En relación a las series SCA observadas, se determinó un suavizado de los datos con media móvil de 3 períodos consecutivos (denominado MM3 en las gráficas) para el cálculo de las Funciones Objetivo (FO). Por su parte, para el cálculo de las series de SCA simuladas, y con el fin de que coincidan las fechas, se optó por seleccionar como dato los mapas de acumulación de nieve correspondientes a la fecha de término de las series observadas (este criterio es empleado tanto en el Período de Calibración como en el Período de Validación). Los resultados obtenidos de desempeño en cobertura de nieve se muestran en la Tabla 5-23

(cabe recordar que los parámetros r , α , β corresponden a las componentes del índice KGE). A continuación, se entregan comentarios respecto de los resultados:

Tabla 5-23: Resultados FO - Desempeño Cobertura de Nieve SCA

Modelación	NSE	r	α	β	KGE
Valores Iniciales	0.71	0.91	1.27	1.03	0.72
Etapa 1	0.44	0.91	1.39	0.81	0.56
Etapa 3	0.44	0.91	1.39	0.81	0.56
Validación	0.21	0.91	1.69	1.01	0.31

- > La modelación con los Valores Iniciales presenta el mejor desempeño (notar semejanza con la gráfica MM3), lo que se refleja tanto en los índices NSE y KGE con valores de 0.71 y 0.72, respectivamente. El valor de r igual a 0.91 indica una fuerte correlación lineal; el coeficiente α de 1.27 refleja una variabilidad mayor en los datos simulados; y un valor de β igual a 1.03, que advierte un sesgo entre datos simulados y observados casi equivalente al óptimo.
- > Las modelaciones de la Etapa 1 y la Etapa 3 tienen el mismo desempeño (notar que las gráficas se traslanan en la Figura 5-29), que empeora respecto a la modelación con los Valores Iniciales, con un valor de NSE y KGE igual a 0.44 y 0.56, respectivamente. Los datos simulados vs observados presentan una fuerte correlación lineal, con un valor de r igual a 0.91; un valor de α igual a 1.39, que indica una mayor variabilidad en los datos simulados; y un valor de β igual a 0.81 que refleja un aumento en el sesgo respecto de la modelación con Valores Iniciales.
- > La modelación de la Etapa de Validación presenta el peor desempeño, con un valor de NSE y KGE de 0.21 y 0.31, respectivamente. El valor de r igual a 0.91 muestra que los datos tienen una fuerte correlación lineal; el valor de β igual a 1.01 indica un sesgo entre los datos simulados y observados de carácter óptimo; y un valor de α igual a 1.69 que refleja una alta variabilidad en los datos simulados.

Pese a las diferencias en el desempeño de las modelaciones, las series simuladas muestran, como es esperable, una variación estacional con valores máximos en el período de invierno. Además, cabe señalar que los resultados de las series de la Etapa 1 y Etapa 3 son idénticos pese a que existen diferencias en la temperatura base T_b , lo que responde a una baja sensibilidad del modelo en ese rango de temperaturas y

para los coeficientes de fusión adoptados. En cuanto al Período de Validación, el bajo rendimiento indica que los parámetros de fusión de nieve no se ajustan satisfactoriamente, y por sobretodo la temperatura base T_b . En gran medida, esto se puede explicar por las diferencias del régimen climatológico (precipitación y temperatura) en la zona de estudio entre el Periodo de Calibración vs Validación.

Sin duda alguna, el modelo de fusión de nieve empleado por TETIS influye en la modelación de acumulación de nieve presente en la cuenca. En este caso, el método de índice-temperatura con coeficientes de fusión constantes e invariantes en el tiempo pueden no simular satisfactoriamente la cobertura de nieve SCA en la cuenca. Esto motiva el uso de modelos de fusión de nieve distribuidos en el espacio, que introducen información como la radiación de onda corta para incorporar la variabilidad en los coeficientes de fusión (GIHMA, 2020).

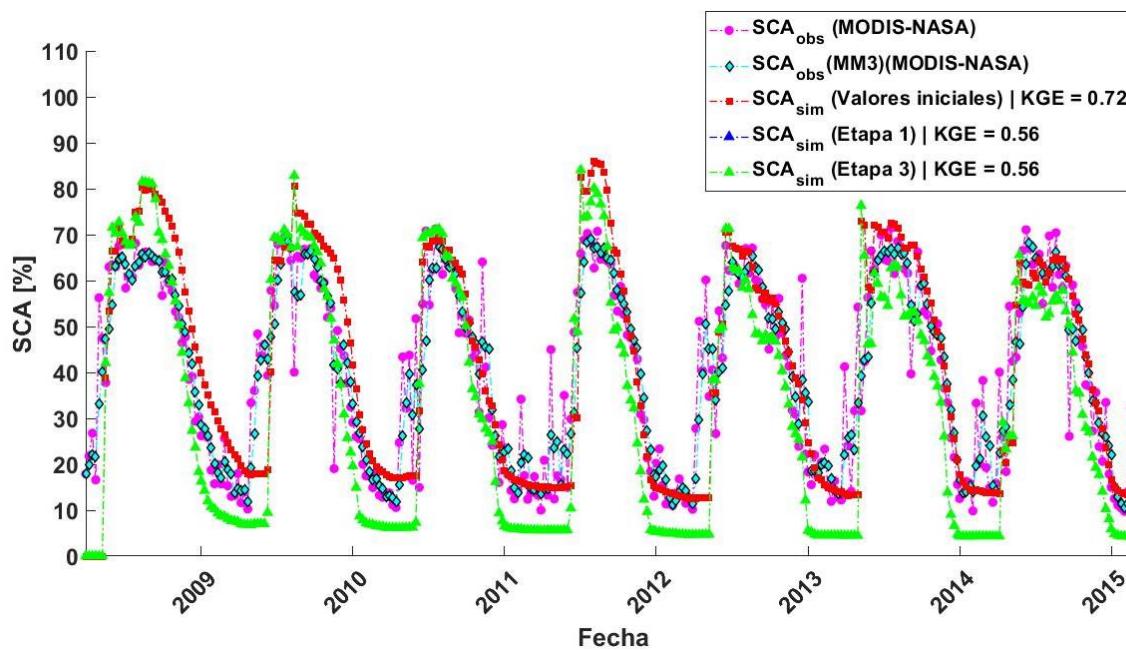


Figura 5-29: Series SCA observada vs simulada - Periodo de Calibración 2008-2015

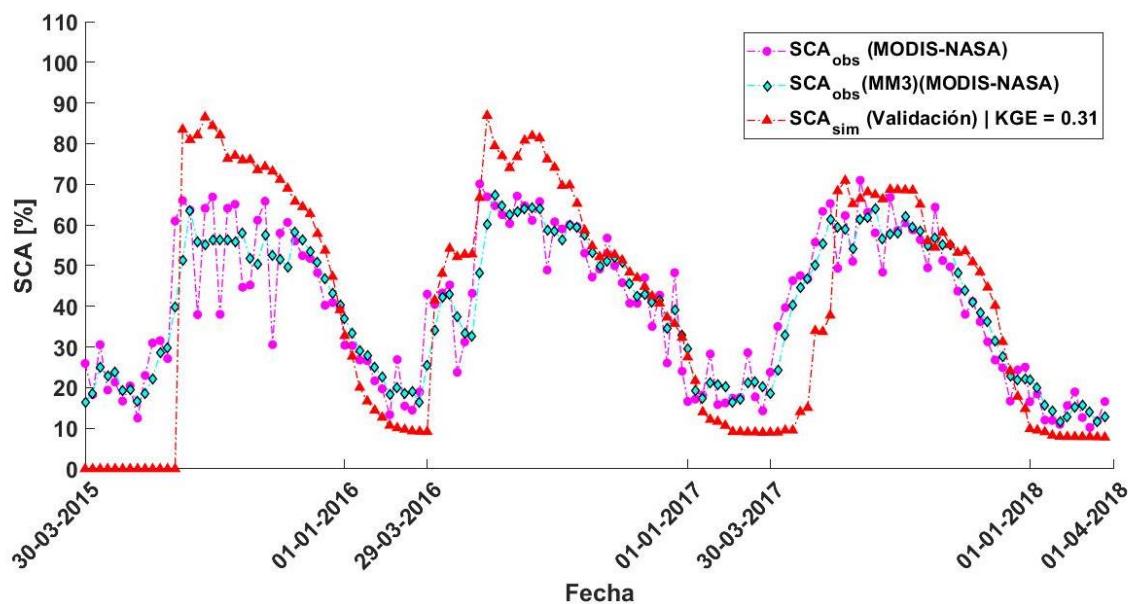


Figura 5-30: Series SCA observada vs simulada - Periodo de Validación 2015-2018

5.4 Evaluación de la incertidumbre de la espacialidad de la precipitación

La información de entrada de mapas de distancia de flujo, junto con la información climatológica de datos grillados CR2 discretizada, permitió determinar los parámetros de momento espacial para evaluar la incertidumbre de la precipitación de un total de 922 eventos de tormentas ocurridas en el Período de Calibración-Validación (01-04-2008 al 01-04-2018). Posteriormente, con los resultados se revisan eventos de *tormentas de alto impacto* que se presentaron y la organización espacial que adoptaron. Cabe recordar que las *tormentas de alto impacto* son aquellas que conducen a una escorrentía igual o mayor al percentil 95% en la Estación Río Colorado.

5.4.1 Parámetros de momento espacial

Para calcular los parámetros de momento espaciales Δ_1 - Δ_2 , se requirió previamente la determinación de los momentos espaciales a escala diaria: P_0, P_1, P_2 . Además, fue necesario determinar los momentos de distancia de flujo g_1 y g_2 , cuyos valores son 52000.3 m y 3153007835.2 m², respectivamente. Posteriormente, con esta información se calcularon los parámetros de momento espacial para cada

tormenta en el período de estudio y que se muestra gráficamente en la Figura 5-31: el eje de las abscisas corresponde al momento Δ_1 y el eje de las ordenadas corresponde a Δ_2 . En primer lugar, la gráfica muestra que la acumulación de tormentas ocurren, a modo general, para valores de Δ_1 y Δ_2 en los intervalos [0.2-1.4] y [0-1.2], respectivamente. En segundo lugar, de la gráfica se puede observar que existe una mayor densidad de tormentas en dos sectores: el primer sector se ubica para valores de Δ_1 en el intervalo [0.8-1.1] y valores de Δ_2 en el intervalo [0.8-1.2], y el segundo sector se ubica para valores de Δ_1 en el intervalo [1.2-1.4] y para valores de Δ_2 en el intervalo [0-0.4]. Dicho esto, se desarrolló un análisis estadístico que se muestra a continuación:

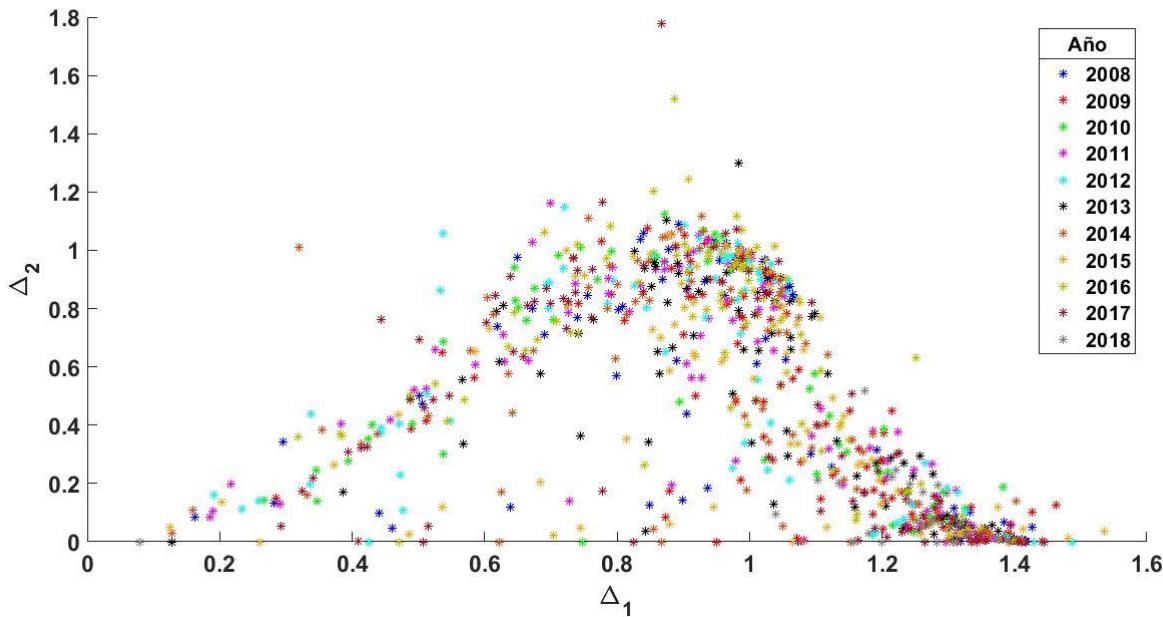


Figura 5-31: Momentos espaciales $\Delta_1-\Delta_2$ para todo el período de estudio

Análisis Estadístico de Tormentas – Parámetros de Momento Espacial

Los parámetros de momentos espaciales fueron calculados para un total de 922 eventos de tormentas ocurridas en el período de estudio. Con esta información, se consideraron las tormentas contenidas en los rangos de Δ_1 y Δ_2 señalados en el párrafo anterior, en donde se cuenta con un subconjunto de 790 tormentas. A partir de dicho subconjunto, se elaboró un análisis estadístico recogiendo variables como: Nro. de tormentas (Figura 5-32), Percentil 50% de la Precipitación Media - Caudal Observado, y el Percentil 99% de la Precipitación Media - Caudal Observado (Precipitación Media en Figura 5-33 y Departamento de Obras Civiles

Caudal Observado en Figura 5-34). Esto permite estudiar la organización espacial de la precipitación en función de los parámetros de momento, tanto en frecuencia como en magnitud, además de incorporar la escorrentía observada en los días con eventos de tormenta. Para presentar la información de forma gráfica, se elaboraron mapas de calor con los resultados y que se muestran a continuación:

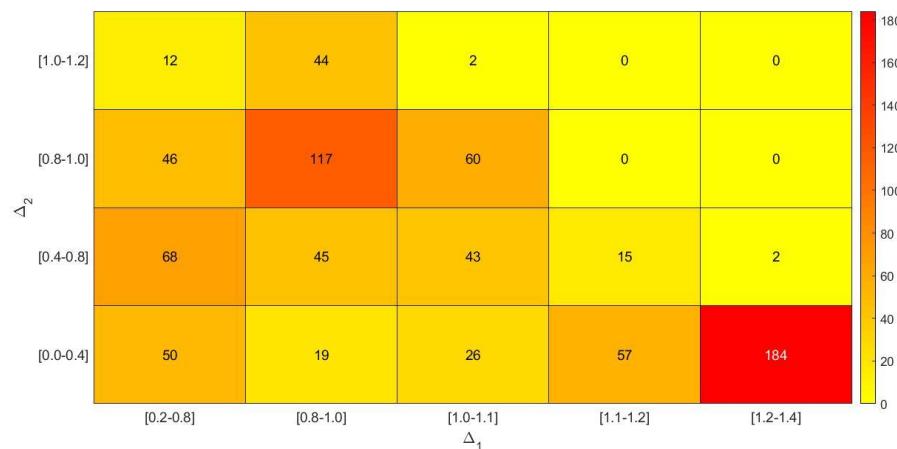


Figura 5-32: Mapa de Calor - Nro. de eventos de tormenta vs Δ_1 - Δ_2

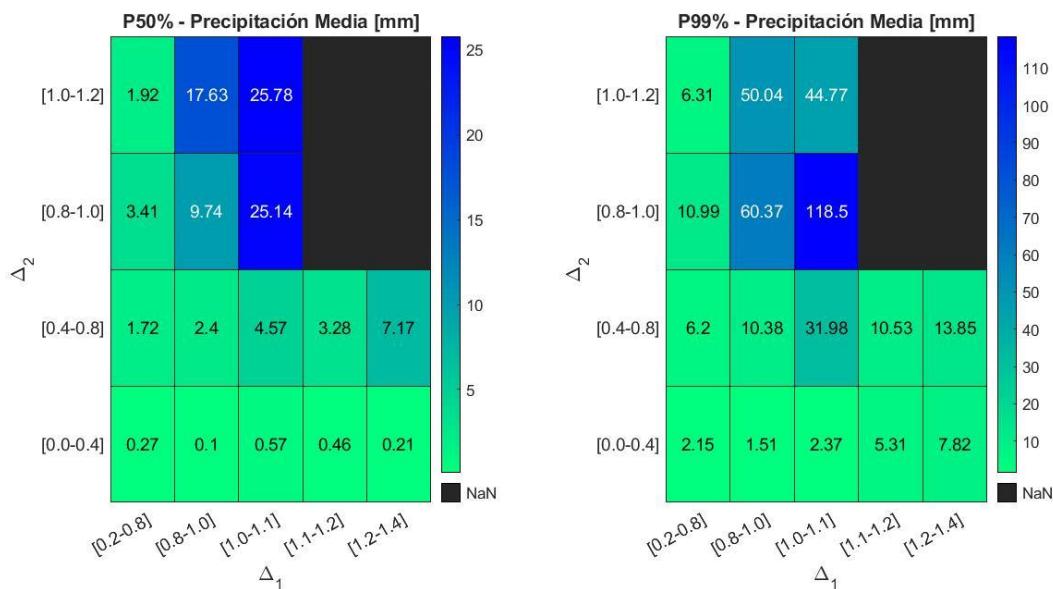
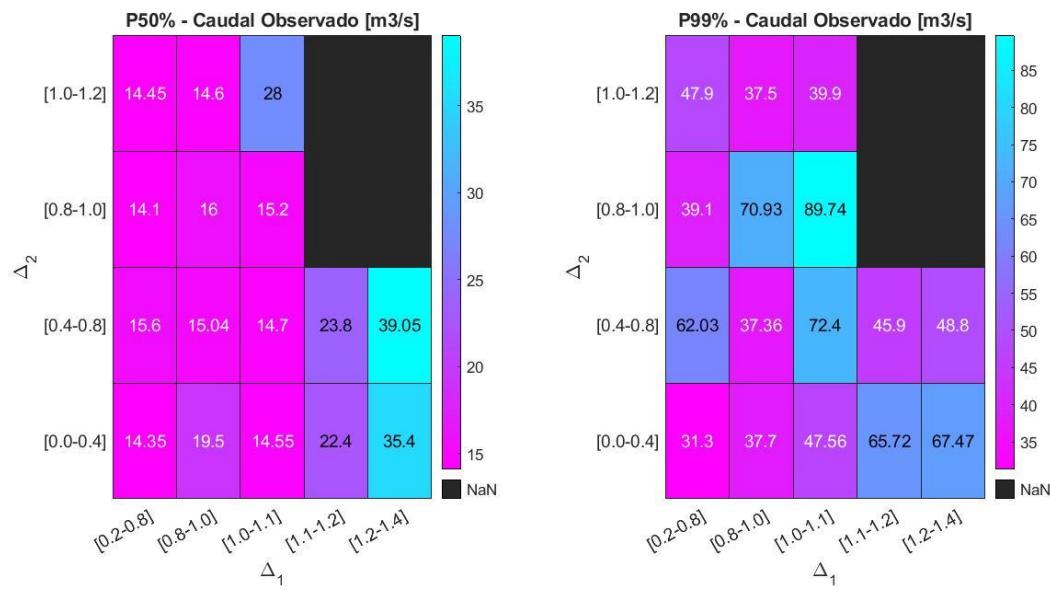


Figura 5-33: Mapa de Calor – P50% & P99% de Precipitación Media vs Δ_1 - Δ_2

Figura 5-34: Mapa de Calor – P50% & P99% de Caudal Observado Estación Río Colorado vs Δ_1 - Δ_2

Discusión de Resultados – Regiones detectadas

La Figura 5-32 muestra el mapa de calor del Nro. de tormentas vs los parámetros de momento espacial, en donde se observa que existen 2 regiones con la mayor frecuencia de tormentas (en color rojo y naranja). La *primera región* (en color naranja) muestra 117 tormentas en los rangos [0.8-1.0] y [0.8-1.0] de los parámetros Δ_1 y Δ_2 , respectivamente, que indica que un 14.81% de las tormentas analizadas se ubican muy cercanas al centroide de la cuenca, junto con una ligera distribución unimodal. La *segunda región* (en color rojo) tiene 184 tormentas en los rangos [1.2-1.4] y [0.0-0.4] de los parámetros Δ_1 y Δ_2 , respectivamente, que muestra que un 23.29% de las tormentas analizadas se ubican en la parte alta de la cuenca, junto con una distribución unimodal significativa (concentradas espacialmente). También, es importante señalar que en las regiones vecinas a la *primera región* señalada se concentran frecuentes episodios de tormentas, que reflejan la tendencia de las tormentas a adoptar una distribución espacial uniforme y a ubicarse en el centroide de la cuenca. Asimismo, es importante notar que son poco frecuentes las tormentas multimodales, definidas por el parámetro Δ_2 en el rango [1.0-1.2], que equivalen a un 7.34% de las tormentas analizadas, y que coincide con lo mencionado en la literatura (Zocatelli et al., 2011).

En la Figura 5-33 y la Figura 5-34 se muestran los mapas de calor del Percentil 50% y el Percentil 99% de las variables Precipitación Media y Caudal Observado de la estación Río Colorado. La *primera región* Departamento de Obras Civiles

detectada en el párrafo anterior muestra que, si bien las tormentas de mayor frecuencia presentan altos valores de precipitación y escorrentía observada, los valores más altos de dichas variables se encuentran en el rango [1.0-1.1] y [0.8-1.0] de los parámetros Δ_1 y Δ_2 , respectivamente (ver región en color cian en P99% de la Figura 5-34). Esto significa que, el mayor impacto en la respuesta hidrológica se logra con tormentas ubicadas ligeramente aguas arriba del centroide, y con una leve distribución unimodal. La *segunda región* detectada en el párrafo anterior muestra bajos valores de precipitación acumulada, pero con valores de escorrentía observada significativos. Esto se debe a que este grupo de tormentas ocurre en su mayoría en el período estival, donde el derretimiento de nieve aporta en mayor medida que la precipitación a la escorrentía total observada en la cuenca.

5.4.2 Eventos de tormentas de alto impacto – Cuenca Río Colorado

Los eventos de *tormentas de alto impacto* tratados se muestran en la Tabla 5-24, junto con la precipitación media y el caudal peak observado (estos eventos ocurren durante el Período de Calibración-Validación). Notar que dichas tormentas conducen a caudales mayores al percentil 95%, que corresponde a un valor de 50.7 m³/s. Para complementar los resultados con una base teórica, se calcularon los tiempos al peak t_{peak} provenientes del Hidrograma Unitario Sintético de Snyder (HUS), usando las expresiones presentadas en la sección 4.8.1. La Tabla 5-25 muestra el tiempo al peak de caudal para una duración efectiva de tormenta t_{LL} igual a 3.25 horas, mientras que la Tabla 5-26 muestra el tiempo al peak de caudal corregido t_{pc} para duraciones reales t_R de tormentas iguales a 1, 2, y 3 días. Es importante recordar que fue necesario emplear valores promedios de los parámetros C_D-C_p (consultar valores en sección 4.8.1). A continuación, se presentará un análisis detallado de los eventos de *tormentas de alto impacto* de la Tabla 5-24.

Tabla 5-24: Eventos de tormentas de alto impacto tratadas

Tormentas de alto impacto		
Fecha	P_{media} [mm]	$Q_{peak,obs}$ [m ³ /s]
15-08-2008	119.7	70.3
05-09-2009	107.7	82.9
06-08-2015	88.5	53.7

Tabla 5-25: Tiempo al peak de caudal - HUS

Hidrograma Unitario Snyder (HUS)		
Cuenca	t_{peak} [hrs]	t_{peak} [dia]
Río Colorado	17.86	0.74

Tabla 5-26: Tiempo al peak de caudal corregido - HUS

Hidrograma Unitario Snyder (HUS)		
t_R [dia]	t_{pc} [dia]	t_{pc} [hrs]
1	0.96	23.05
2	1.21	29.05
3	1.46	35.05

Evento 15-08-2008

En la Figura 5-35 se muestra la información climatológica (precipitación media) y el caudal observado en la estación Río Colorado, en conjunto con los parámetros de momentos espaciales. El evento de tormenta comienza el día 14-08-2008, cuyo peak se alcanza el día 15-08-2008 con una precipitación de 119.7 [mm], y que culmina al día siguiente con una precipitación de 19.76[mm]. En cuanto a los parámetros de momento espaciales: el valor de Δ_1 se mantiene en el rango [0.97-1.02], que representa tormentas ubicadas en la cercanía del centroide de la cuenca; mientras que el valor de Δ_2 se mantiene en el rango [0.93-0.98], que indican tormentas ligeramente concentradas espacialmente a tormentas de distribución espacial uniforme. La configuración espacial de la tormenta presenta leves variaciones en la ubicación de la tormenta respecto del centroide, pero la ubicación para el día de mayor magnitud se ubica ligeramente aguas arriba del centroide. El evento tiene como consecuencia un rápido aumento del caudal observado de la cuenca, seguido de un abrupto decrecimiento cuando la precipitación disminuye. Cabe señalar que esta tormenta se encuentra dentro de la región *con mayor impacto en la escorrentía, la que fue detectada en la sección 5.4.1.*

De la gráfica se desprende que el tiempo al peak de caudal ocurre aproximadamente 1 día después del comienzo de la tormenta de alto impacto, siendo bastante similar a lo estimado por medio del HUS (ver fila n°1 de Tabla 5-26). Esto indica una estimación satisfactoria del punto de vista teórico.

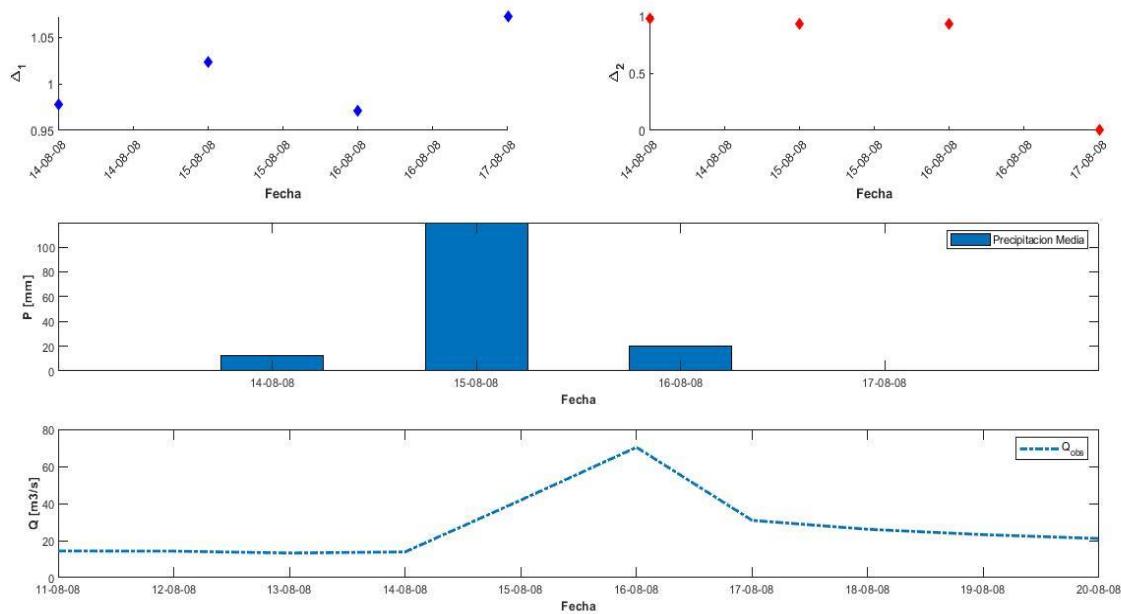


Figura 5-35: Evento Extremo 15-08-2008 – Análisis tormentas de alto impacto

Evento 05-09-2009

En la Figura 5-36 se muestra la información climatológica (precipitación media) y el caudal observado en la estación Río Colorado, en conjunto con los parámetros de momentos espaciales. El evento de tormenta comienza el día 04-09-2009, cuyo peak ocurre el día 05-09-2009 con una precipitación de 107.7[mm], y que culmina con un valor de 7.3[mm] el día 07-09-2009. En relación a los parámetros de momento espaciales: el valor de Δ_1 se mantiene en el rango [0.91-1.04], que representa tormentas ubicadas en la cercanía del centroide de la cuenca; mientras que el valor de Δ_2 se mantiene en el rango [0.85-0.92], que indican tormentas ligeramente concentradas espacialmente a tormentas de distribución espacial uniforme. Al igual que en el caso anterior, la configuración espacial de la tormenta presenta ligeras variaciones en torno al centroide de la cuenca, pero que en los días de mayor magnitud se ubica levemente por sobre el centroide de la cuenca. El evento tiene como consecuencia un rápido aumento del caudal observado de la cuenca, seguido de una disminución progresiva a medida que disminuye la precipitación. Esta tormenta se encuentra en la *región con mayor impacto en la escorrentía, que fue detectada en la sección 5.4.1.*

De la gráfica se desprende que el tiempo al peak de caudal ocurre aproximadamente 1 día después del comienzo de la tormenta, siendo bastante similar a lo estimado por medio del HUS (ver fila n°2 de Tabla 5-26). Por ende, la estimación teórica entrega buenos resultados para este evento.

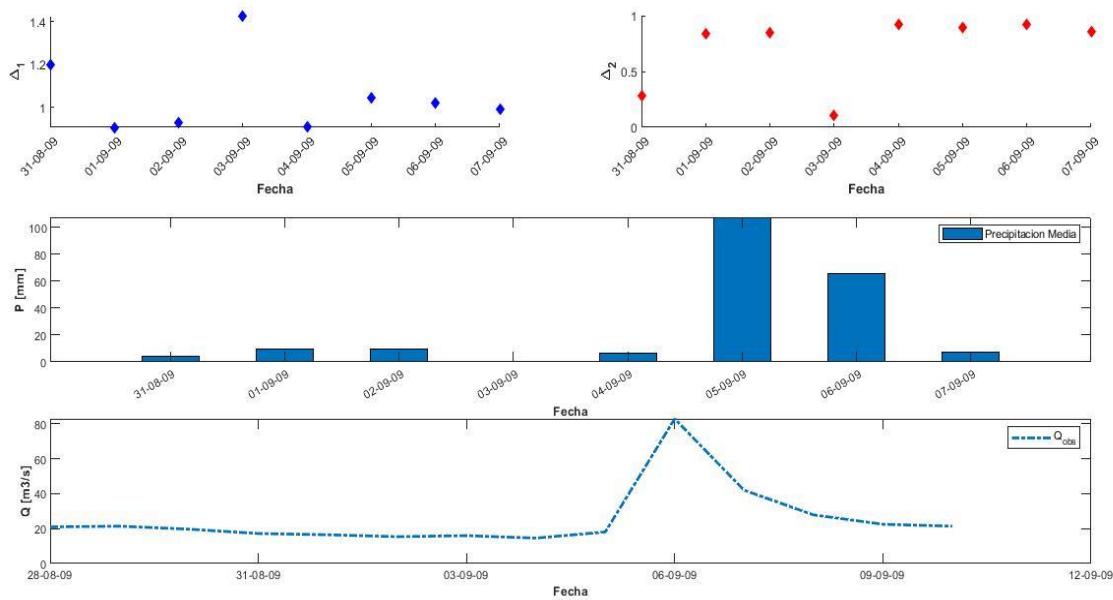


Figura 5-36: Evento Extremo 05-09-2009 – Análisis tormentas de alto impacto

Evento 06-08-2015

En la Figura 5-37 se muestra la información climatológica (precipitación media) y el caudal observado en la estación Río Colorado, en conjunto con los parámetros de momentos espaciales. El evento de tormenta comienza el día 05-08-2015, cuyo peak ocurre el día 06-08-2015 con una precipitación de 88.5[mm], y que culmina con un valor de 3.3[mm] el día 09-08-2015. En relación a los parámetros de momento espaciales: el valor de Δ_1 se mantiene en el rango [0.59-1.04], que indica una tormenta que se ubica cerca del centroide, y que al transcurrir los días se ubica aguas abajo del centroide; mientras que el valor de Δ_2 se mantiene en el rango [0.65-0.98], comenzando con una tormenta uniformemente distribuida, y que al transcurrir los días se vuelve una tormenta espacialmente concentrada. En este caso particular se observa que hay una evolución en la configuración espacial conforme disminuye la magnitud de la precipitación: esto es, la tormenta se desplaza hacia la parte baja de la cuenca y se distribuye de manera más concentrada.

Dada la configuración espacial de la tormenta en los días de mayor magnitud, la respuesta hidrológica es bastante similar a los eventos anteriores, con un alza rápida del caudal hasta su valor peak, seguido de un descenso abrupto al finalizar la tormenta de alto impacto, para finalizar con un decrecimiento progresivo en los días siguientes.

Al igual que en los eventos anteriores, el tiempo al peak de caudal ocurre 1 día después del comienzo de la tormenta, siendo bastante similar a lo estimado por medio del HUS (ver fila n°2 de Tabla 5-26). Por ende, la estimación teórica entrega buenos resultados para este evento.

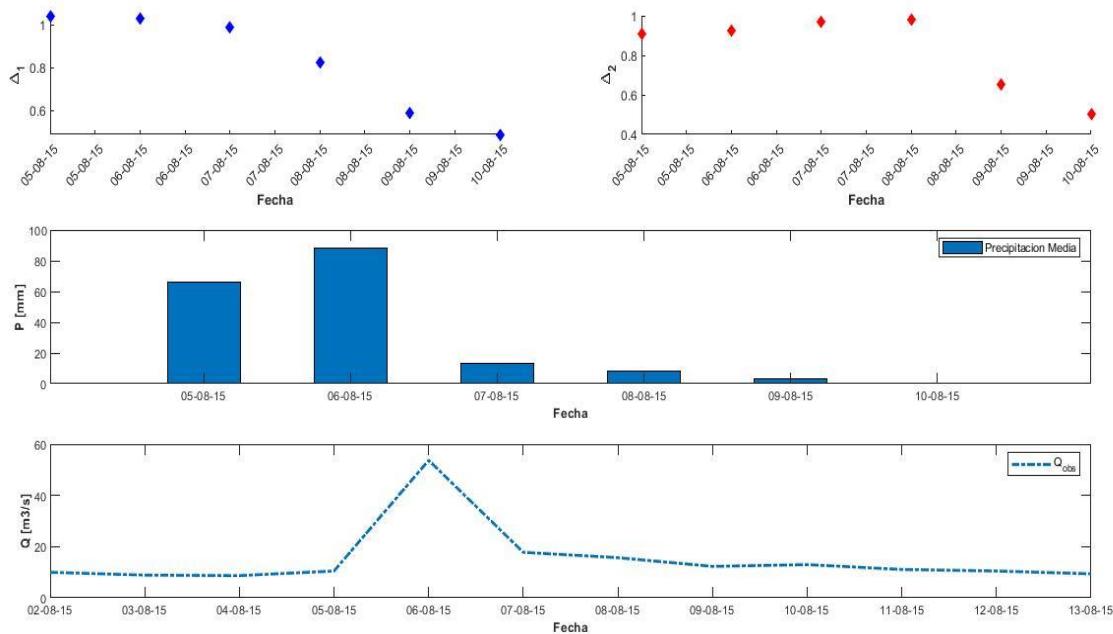


Figura 5-37: Evento Extremo 06-08-2015 – Análisis tormentas de alto impacto

6 CONCLUSIONES

La modelación hidrológica con el software TETIS ofrece ventajas dada la variabilidad espacial y temporal que incorpora, además de incluir procesos físicos como la fusión de nieve que fue considerado en este trabajo. Pese a ello, requiere un amplio conocimiento de la zona de estudio, entre lo que se destaca: parámetros geomorfológicos, mapas de variables de entrada e índices de vegetación, además de contar con información climatológica y fluviométrica de calidad. En este contexto, la información climatológica de entrada de la fuente de datos CR2MET empleada en este trabajo entregó una base sólida de precipitación y temperaturas para el período de estudio, permitiendo además contar con una grilla de 64 puntos para la cuenca de estudio. Dicho esto, en el caso de Chile el desafío es promover la investigación para generar dicha información a nivel nacional, ya que sería una herramienta de gran utilidad para el estudio de cuenca naturales de distinta naturaleza, y así fomentar el uso de *modelos hidrológicos distribuidos*.

Los diagramas de dispersión obtenidos en la metodología de Calibración-Validación fueron fundamentales para definir el óptimo global de los parámetros, ya que permiten vislumbrar la sensibilidad de todos los parámetros, con especial atención en los parámetros de fusión de nieve: cualquier variación de la temperatura base T_b y de los coeficientes de fusión pueden ocasionar un cambio significativo en la simulación hidrológica (tanto en términos de caudal como de cobertura de nieve SCA). En otras palabras, para encontrar un buen ajuste del modelo, fue necesario en primer lugar acotar los rangos de ciertos parámetros, y en caso contrario considerar que pueden adoptar cualquier valor dentro del rango definido en un comienzo. Como resultado de lo señalado se propone la metodología de Calibración-Validación, que contempló la ejecución de una secuencia de etapas para encontrar una solución final.

El caudal observado vs el caudal simulado del Río Colorado presenta una similitud bastante satisfactoria para la solución del óptimo global, tal como se evidencia en términos de las funciones objetivo. En cuanto a las FO, cabe señalar que el índice KGE presentó mejoras significativas en todas sus componentes para la etapa de Calibración, pero que se degrada en la etapa de Validación. En relación al hidrograma, para eventos de *tormentas de alto impacto* se observaron caudales peak simulados menores a los observados: en primer lugar, esto puede deberse a que las FO empleadas en el proceso de calibración se enfocan en

optimizar toda la serie de datos, y no exclusivamente los peaks de escorrentía; en segundo lugar, la elevada capacidad de almacenamiento estático repercute en una incapacidad y/o subestimación por parte del modelo en reproducir peaks de escorrentía; y en tercer lugar, los valores empleados de conductividades hidráulicas tanto de infiltración como de percolación pueden ser inadecuadas para el modelo, afectando en consecuencia la respuesta hidrológica. Además, dichas FO pueden no estar captando satisfactoriamente los considerables cambios en el régimen climático (precipitación y temperaturas) que ocurren en la cuenca de estudio, tanto el Período de Calibración como en el Período de Validación. También, es posible que el *Método de Índice Temperatura* no reproduzca apropiadamente la fusión de nieve en la cuenca, motivando el uso del *Modelo de Fusión de Nieve Distribuido* en el espacio incorporado en TETIS (requiere información adicional de mapas de radiación). Los motivos señalados explican, por ejemplo, las diferencias detectadas durante el período estival del año 2009-2012-2015, en donde se subestima el derretimiento de nieve en la cuenca. En cuanto a la cobertura de nieve SCA, cabe señalar que en todas las modelaciones las series simuladas presentan variaciones estacionales de la cobertura de nieve, con máximos en el período de invierno, lo que coincide con los datos observados.

El cálculo de parámetros de momento espaciales permite incorporar la organización espacial propia de los eventos de precipitación, y cómo dicha variable influye en la respuesta hidrológica de una cuenca. En el presente trabajo se elaboraron mapas de calor según los rangos de los parámetros de momento espacial, y de esta manera detectar la configuración espacial de las tormentas con mayor impacto en la escorrentía observada, así como también las tormentas más frecuentes del período. En este contexto, la aplicación del procedimiento efectuado en diferentes cuencas conducirá a distintos resultados, dependiendo de la heterogeneidad en las propiedades geomorfológicas, tamaño de la cuenca y la organización espacial de las tormentas (Zocatelli et al., 2011). En cuanto a los resultados obtenidos, cabe señalar que las tormentas invernales que causan las mayores crecidas del período se ubican en la porción central de la cuenca, ligeramente sobre su centroide, junto con una leve distribución unimodal (dentro de este grupo se encuentran las *tormentas de alto impacto* analizadas). Adicionalmente, debido a la fusión de nieve presente en la cuenca de estudio, fue posible detectar un grupo importante de tormentas en período estival de baja precipitación, ubicadas en la cabecera de la cuenca (parte alta), junto con una considerable distribución unimodal (concentrada espacialmente), que conducen a importantes valores de escorrentía.

REFERENCIAS

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración de cultivo. *Estudio FAO Riego y Drenaje*(56), 89-91.
- Alva Pretel, H. D. (2017). *Influencia de los cambios históricos el uso de suelo en el régimen hídrico del Barranco Carraixet*. U.P.V, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Batjes, N. (2005). *SOTER-based soil parameter estimates for Latin America and the Caribbean (Version 1.0)*. ISRIC - World Soil Information, Wageningen.
- Bennett, N., Croke, B., Guariso, G., Guillaume, J., Hamilton, S., Jakeman, A., . . . Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 40, 1-20.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- Beven, K. (2000). *Rainfall - Runoff Modelling: The Primer*. Chichester, U.K: John Wiley and sons Ltd.
- Britannica, T. E. (14 de Agosto de 2019). *Mediterranean climate*. Obtenido de Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/Mediterranean-climate>
- Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2. (2013). *Explorador Climático*. Obtenido de <https://explorador.cr2.cl/>
- Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2. (2013). *Productos Grillados CR2MET*. Obtenido de <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>
- DeWalle, D., & Rango, A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge: Cambridge University Press. 410pp.
- Dirección General de Aguas . (1989). *Mapa Hidrogeológico de Chile*. Santiago.
- Douinot, A., Roux, H., Garambois, P.-A., Larnier, K., Labat, D., & Dartus, D. (2016). Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood. *Journal of Hydrology*, 541, 359-370.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28, 1015-1031.
- Dussaubat, S., Vargas, X., & Ortiz, J. (2006). Evaluación de la incertidumbre en la variabilidad espacial de la precipitación usando un modelamiento multiGaussiano. *IAHS*, 308.

- FAO. (2006). *Portal de Suelos de la FAO : Base Referencial Mundial - Version 2006*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/base-referencial-mundial/es/>
- Ferrero, V. (2004). Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno.
- Francés, F., Vélez, J., & Vélez, J. (2007). Split-Parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332, 226 - 240.
- GIHMA. (2020). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9*. U.P.V, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Valencia.
- GIMHA. (2020). *Manual de Usuario Programa TETIS v.9*. Manual de Usuario, U.P.V, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Valencia.
- Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., & Martinez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.
- Hernández, H., Galleguillos, M., & Estades, C. (Junio de 2016). *Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014*. Obtenido de Geomática y Ecología de Paisaje GEP: http://www.gep.uchile.cl/Landcover_CHILE.html
- Hock, R. (2003). Temperatura Index Melt Modelling in Mountain Areas. *Journal of Hydrology*, 282, 104-115.
- IGME. (26 de Mayo de 2020). *Mapa Litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España a escala 1:200.000*.
- ISRIC World Soil Information. (Febrero de 2005). *Soil and Terrain (SOTER) database programme: ISRIC*. Obtenido de ISRIC World Soil Information: <https://www.isric.org/projects/soter-and-wise-based-soil-property-estimates-latin-america-and-caribbean>
- Jarvis, A., Reuter, H., A., N., & Guevara, E. (2008). *Hole-filled seamless SRTM data V4*. Obtenido de CGIAR - CSI: <http://srtm.cgiar.org>
- Lidén, R., & Harlin, J. (2000). Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. *Journal of Hydrology*, 238, 231-247.
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235, 276-288.
- Meijerink, A., de Brouwer, J., Mannaerts, C., & Valenzuela, C. (1994). Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology: IHP - IV M 2.3. *ITC*, 23.

- Montoya Monsalve, J. J. (2008). *Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos*. Tesis Doctoral, UPV, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Múnера, J., & Francés, F. (2008). Modelación Hidrológica distribuida de la cuenca Saja-Besaya, para estimación probabilística de avenidas en los períodos de estiaje. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Orozco Medina, I. (2014). *Modelación Parsimoniosa y Espacialmente Distribuida de los procesos de Acumulación y Fusión de Nieve*. Tesis Doctoral, U.P.V, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Ponce, V. M. (1994). *Engineering Hydrology : Principles and Practices*.
- Ramírez, L. (2012). *Análisis de la Implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España*. U.P.V, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Ramos Fernández, L., & Francés García, F. (2014). Modelación hidrológica distribuida aplicada a la cuenca hidrográfica del río Júcar (España). *Anales Científicos*, 75, 324-333.
- Riquelme, J. (2010). Incertidumbre de las variables meteorológicas en la estimación de los recursos hídricos futuros en la cuenca del Río Pangal., (págs. 1-3). Santiago de Chile.
- Román, M., Hall, D., & Riggs, G. (2016). MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m SIN Grid. *NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center*, 6. doi:10.5067/MODIS/MOD10A2.006
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps* 13(2), 66-73.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital. Escala 1:1000000*. Obtenido de <https://www.ciren.cl/>: <http://bosques.ciren.cl/handle/123456789/16327>
- Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1983). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resources Research*, 19, 260-268.
- Stowhas, L. (2016). *Fundamentos de Hidrología Aplicada*. Valparaíso: Editorial USM.
- Te Chow , V., R. Maidment, D., & W. Mays, L. (1993). Hidrología Aplicada. McGraw - Hill.

- Tejada Espinoza, H. E. (2016). *Caracterización del régimen de crecidas mediante la implementación de modelo hidrológico TETIS en la cuenca del barranco del Carraixet - Valencia*. U.P.V, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Tesis Doctoral, U.P.V, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Vélez, J. J. (2003). *Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas*. Tesis Doctoral, U.P.V, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Vélez, J., Puricelli, M., López Unzu, F., & Francés, F. (2009). Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth Syst. Sci.*, 13, 229-246.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., . . . Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170-185.
- Zocatelli, D., Borga, M., Viglione, A., Chirico, G., & Blosch, G. (2011). Spatial moments of catchment rainfall: rainfall spatial organisation, basin morphology, and flood response. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3767-3783.
- Zocatelli, D., Borga, M., Zanon, F., Antonescu, B., & Stancalie, G. (2010). Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A Numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania. *Journal of Hydrology*, 394, 148-161.

ANEXOS

ANEXO I: Datos Extremos – Estación Río Colorado vs Estación Río Maipo

Evento 27-11-2008

Tabla I.1: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Noviembre 2008

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m³/s]	Río Maipo [m³/s]	P1 [mm]	P2 [mm]
11-11-2008	52.2	220	0	0
12-11-2008	54.7	240	0	0
13-11-2008	59.7	276	0	0
14-11-2008	61.2	284	0	0
15-11-2008	59.9	278	0	0
16-11-2008	57.3	263	0	0
17-11-2008	58.9	277	0	0
18-11-2008	60	275	0	0
19-11-2008	62.3	277	0	0
20-11-2008	66.2	289	0	0
21-11-2008	70.5	303	0	0
22-11-2008	74.3	306	0	0
23-11-2008	73.6	305	0	0
24-11-2008	70.5	303	0	0
25-11-2008	73.7	296	0	0
26-11-2008	76.1	305	0	0
27-11-2008	75.8	310	0	0
28-11-2008	69.6	277	0	0
29-11-2008	66.8	286	0	0
30-11-2008	68.8	295	0	0
01-12-2008	66.9	296	0	0

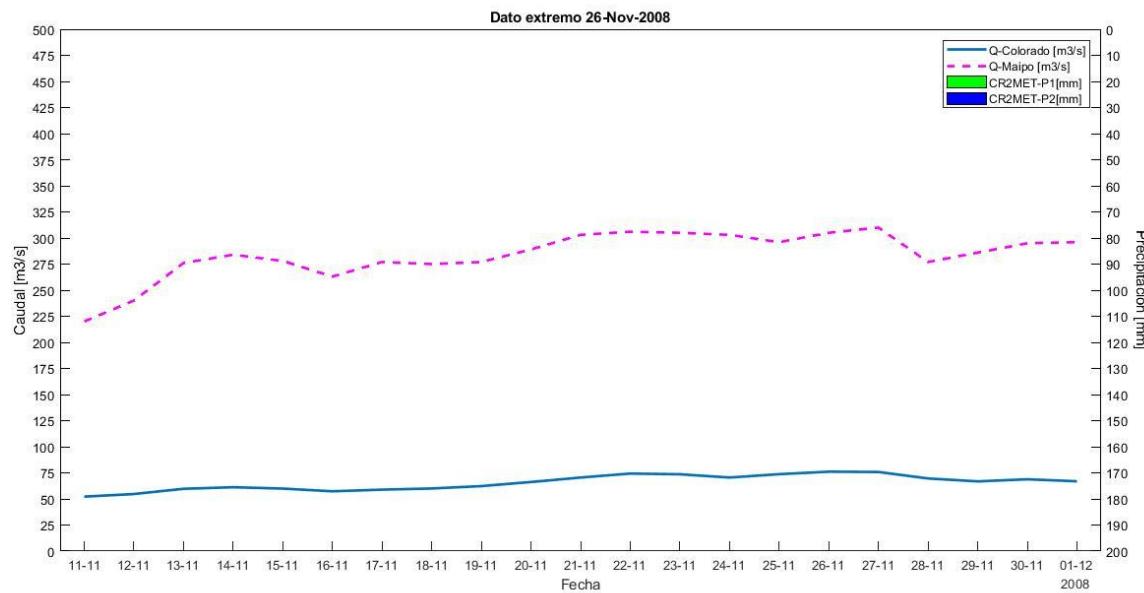


Figura I.1: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Noviembre 2008

Evento 16-12-2008

Tabla I.2: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Diciembre 2008

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
01-12-2008	66.9	296	0	0
02-12-2008	60.6	299	0	0
03-12-2008	66	307	0	0
04-12-2008	59.2	291	0	0
05-12-2008	58.5	288	0	0
06-12-2008	59.4	296	0	0
07-12-2008	60	300	0	0
08-12-2008	65.9	309	0	0
09-12-2008	68.5	293	0	0
10-12-2008	66.9	293	0	0
11-12-2008	69.1	315	0	0
12-12-2008	64.4	290	0	0
13-12-2008	61.3	289	0	0
14-12-2008	62.8	302	0	0
15-12-2008	75	330	0	0

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
16-12-2008	82.3	320	0	0
17-12-2008	79.8	312	0	0
18-12-2008	75.8	296	0	0
19-12-2008	73.3	289	0	0
20-12-2008	78	288	0	0
21-12-2008	73.5	275	0	0

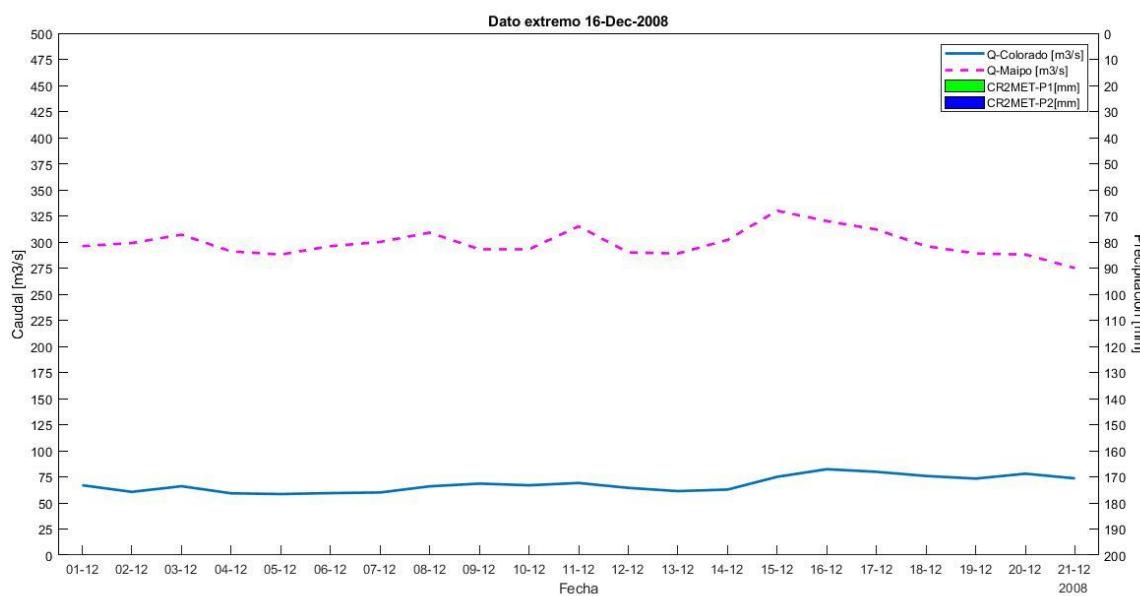


Figura I.2: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Diciembre 2008

Evento 29-12-2011

Tabla I.3: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Diciembre 2011

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
14-12-2011	61.6	105	0	0
15-12-2011	67.3	113	0	0
16-12-2011	67.3	109	0	0

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
17-12-2011	59.3	94.5	0	0
18-12-2011	60.8	97.2	0	0
19-12-2011	61.3	96.9	0	0
20-12-2011	56.9	88.5	0	0
21-12-2011	57.8	88.3	0	0
22-12-2011	56.8	82.2	0	0
23-12-2011	57.3	82.5	0	0
24-12-2011	57.1	81.6	0	0
25-12-2011	59.4	81.1	0	0
26-12-2011	62.8	87.3	0	0
27-12-2011	66.1	95	0	0
28-12-2011	72.9	100	0	0
29-12-2011	79.4	110	0	0
30-12-2011	71.3	101	0	0
31-12-2011	72.5	101	0	0
01-01-2012	78.3	108	0	0
02-01-2012	73	103	0	0
03-01-2012	74.9	105	0	0

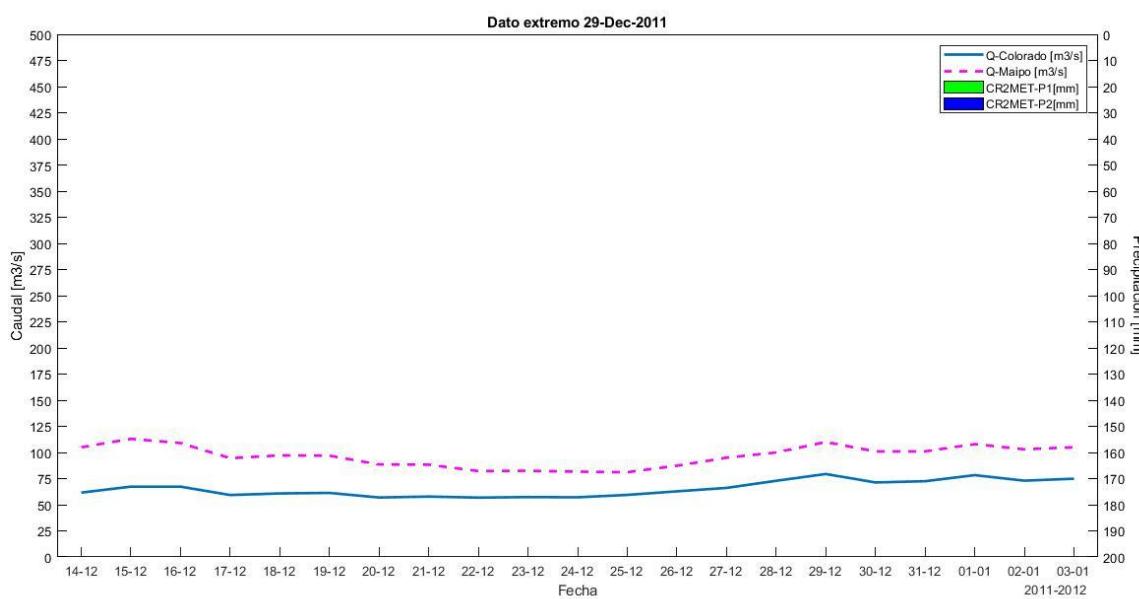


Figura I.3: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Diciembre 2011

Evento 23-01-2016

Tabla I.4: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Enero 2016

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
08-01-2016	34.6	143	0	0
09-01-2016	33.7	139	0	0
10-01-2016	38.5	148	0	0
11-01-2016	44.2	166	0	0
12-01-2016	48.3	179	0	0
13-01-2016	40.5	151	0	0
14-01-2016	43.7	156	0	0
15-01-2016	44.2	161	0	0
16-01-2016	47.3	168	0	0
17-01-2016	50	173	0	0
18-01-2016	52.8	179	0	0
19-01-2016	56	185	0	0
20-01-2016	60.4	191	0	0
21-01-2016	67.1	209	0	0
22-01-2016	70.3	218	0	0
23-01-2016	72.2	218	8.8	9.36
24-01-2016	64.6	215	0	0
25-01-2016	48.5	164	0	0
26-01-2016	40.8	140	0	0
27-01-2016	37.7	137	0	0
28-01-2016	35.5	129	0	0

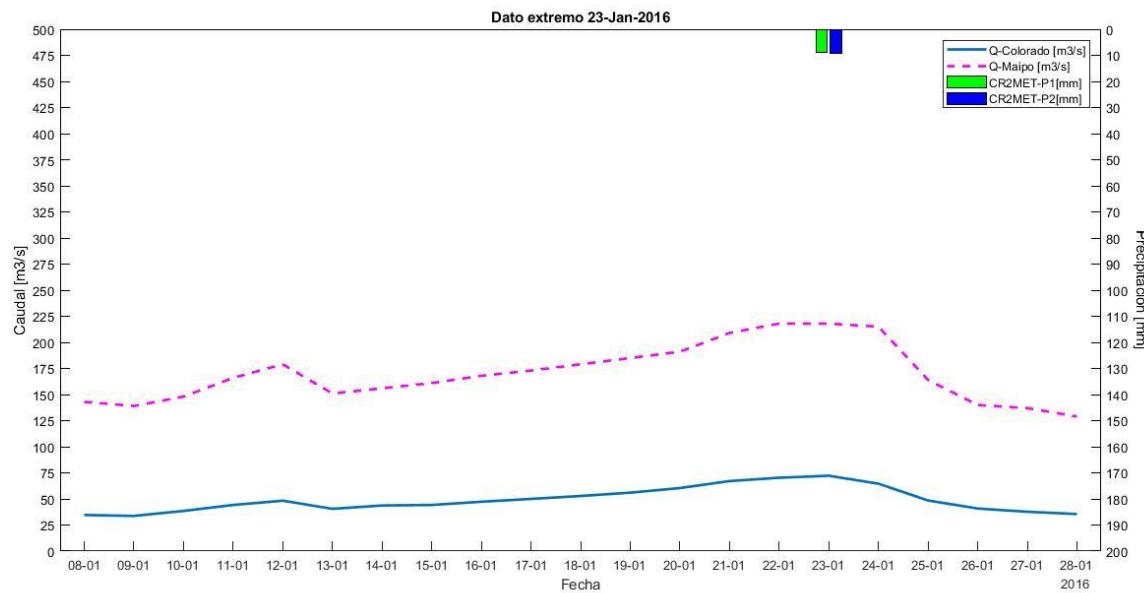


Figura I.4: Comparación de datos fluviométricos y pluviométricos – Enero 2016

Evento Mes de Mayo-2008

Tabla I.5: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Mayo 2008

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
06-05-2008	13.8	56.6	0	0
07-05-2008	13.7	55.6	0	0
08-05-2008	13.7	54	0	0
09-05-2008	13.6	52.6	0	0
10-05-2008	13.6	52.6	0	0
11-05-2008	13.7	52.2	0	0
12-05-2008	13.6	52.4	0	0
13-05-2008	13.7	52.5	0	0
14-05-2008	13.7	52.5	0	0
15-05-2008	13.7	51.9	0	0
16-05-2008	13.7	52.7	0	0
17-05-2008	14.1	51.8	0	0
18-05-2008	13.7	51.4	27.86	30.18
19-05-2008	30.6	84.9	32.64	35.55
20-05-2008	24.9	76.6	32.74	33.3

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
21-05-2008	80.3	277	19.39	20.78
22-05-2008	36	235	48.38	46.57
23-05-2008	68.1	417	5.78	6.38
24-05-2008	30	143	0	0
25-05-2008	23.9	97.5	0	0
26-05-2008	26.6	104	44.95	45.24

Evento Mes de Junio-2008

Tabla I.6: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Junio 2008

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
20-05-2008	24.9	76.6	32.74	33.3
21-05-2008	80.3	277	19.39	20.78
22-05-2008	36	235	48.38	46.57
23-05-2008	68.1	417	5.78	6.38
24-05-2008	30	143	0	0
25-05-2008	23.9	97.5	0	0
26-05-2008	26.6	104	44.95	45.24
27-05-2008	42.8	160	43.13	42.68
28-05-2008	32	114	1.41	2.05
29-05-2008	24.5	91.8	0	0
30-05-2008	22.1	82.1	0	0
31-05-2008	20.7	78	0	0
01-06-2008	20.4	75.8	0	0
02-06-2008	21	72.7	0	0
03-06-2008	21.2	75.2	17.23	18.73
04-06-2008	90.5	290	49.57	47.31
05-06-2008	72.4	309	0	0.35
06-06-2008	35.4	139	0	0
07-06-2008	29.7	111	0	0
08-06-2008	26.5	98.1	0	0
09-06-2008	23.9	93.5	0	0

Evento Mes de Septiembre-2009

Tabla I.7: Datos fluviométricos y puntos CR2MET – Septiembre 2009

Fecha	Estación Fluviométrica		CR2MET	
	Río Colorado [m ³ /s]	Río Maipo [m ³ /s]	P1 [mm]	P2 [mm]
22-08-2009	16.9	67.9	0	0
23-08-2009	16.7	65.9	0	0
24-08-2009	16.2	64.5	0	0
25-08-2009	17	69.5	0	0
26-08-2009	18.9	84.1	0	0
27-08-2009	20.1	89.2	0	0
28-08-2009	21	79.8	0	0
29-08-2009	21.4	81.7	0	0
30-08-2009	19.7	76.9	0	0
31-08-2009	17.2	68.4	0	0
01-09-2009	16.5	64.3	7.52	8.94
02-09-2009	15.4	60.4	7.35	8.22
03-09-2009	16	58.9	0	0
04-09-2009	14.6	56.4	7.37	7.63
05-09-2009	18.1	72	70.81	68.47
06-09-2009	82.9	365	37.69	38.75
07-09-2009	42	201	2.56	3.76
08-09-2009	27.9	119	0	0
09-09-2009	22.5	94.8	0	0
10-09-2009	21.4	81.7	0	0
11-09-2009	20.3	76.5	0	0

ANEXO II: Distancia de Flujo – Puntos CR2MET

Tabla II.1: Distancias de Flujo de Puntos CR2MET

Punto – CR2MET	Flow _{dist} [km]	Punto – CR2MET	Flow _{dist} [km]
1	4.11	33	38.88
2	6.62	34	51.38

Punto – CR2MET	$Flow_{dist}$ [km]	Punto – CR2MET	$Flow_{dist}$ [km]
3	13.25	35	59.94
4	22.17	36	55.30
5	13.55	37	69.85
6	13.72	38	68.77
7	23.20	39	75.41
8	20.91	40	80.18
9	18.50	41	84.88
10	26.40	42	45.09
11	33.07	43	42.86
12	83.76	44	49.42
13	24.47	45	55.42
14	24.93	46	62.39
15	27.99	47	57.17
16	41.48	48	52.57
17	46.56	49	55.19
18	53.81	50	58.84
19	60.17	51	67.45
20	68.34	52	65.78
21	77.36	53	60.80
22	79.61	54	60.20
23	37.33	55	66.74
24	32.39	56	75.16
25	38.78	57	74.39
26	44.78	58	68.88
27	51.36	59	68.02
28	58.23	60	69.88
29	64.71	61	69.38
30	70.99	62	72.35
31	77.36	63	73.74
32	38.52	64	73.29

ANEXO III: Diferencias entre datos grillados CR2 y estaciones climatológicas de precipitación

Evento 15-04-2016

En la figura adjunta a continuación se muestra la precipitación media generada con el software TETIS a partir de los datos grillados CR2MET y la precipitación informada por las estaciones climatológicas:

“Maipo en el Manzano” y “Maitenes Bocatoma” presentes en la cuenca del Río Colorado. Es evidente que existen diferencias durante los días 14-15 de abril, provocando discrepancias entre las escorrentías simuladas y observadas. Esta tendencia se repite en otros períodos y es más evidente en eventos de tormentas de alta magnitud.

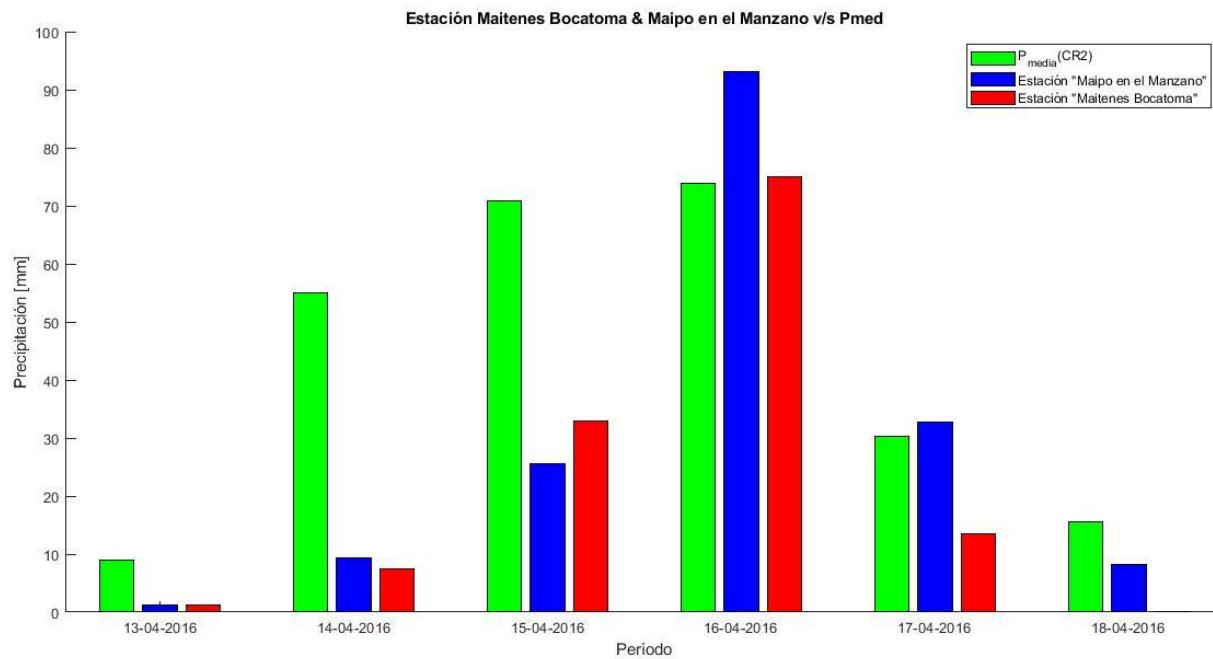


Figura III.1: Comparación Precipitación Media CR2MET vs Estación Maipo en el Manzano y Estación Maitenes Bocatoma

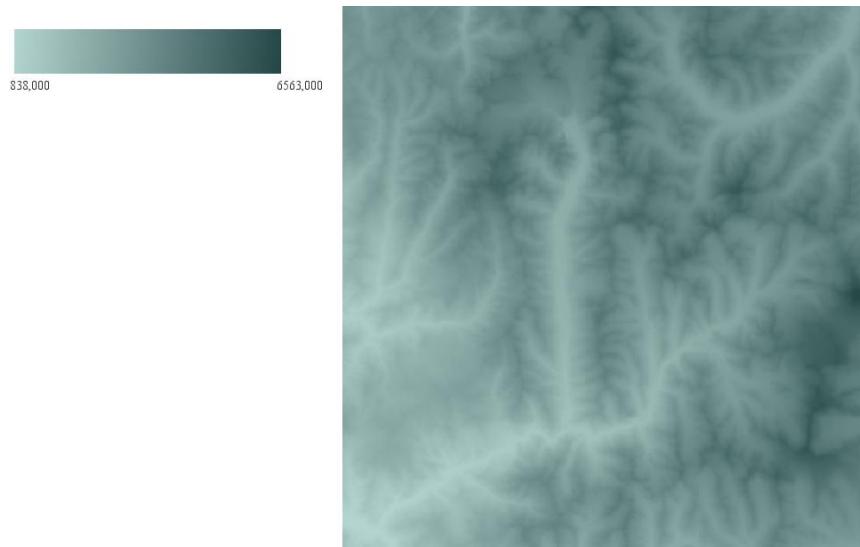
ANEXO IV: Modelación Hidrológica – Mapas de entrada TETIS**Mapa MED**

Figura IV.1: Mapa MED

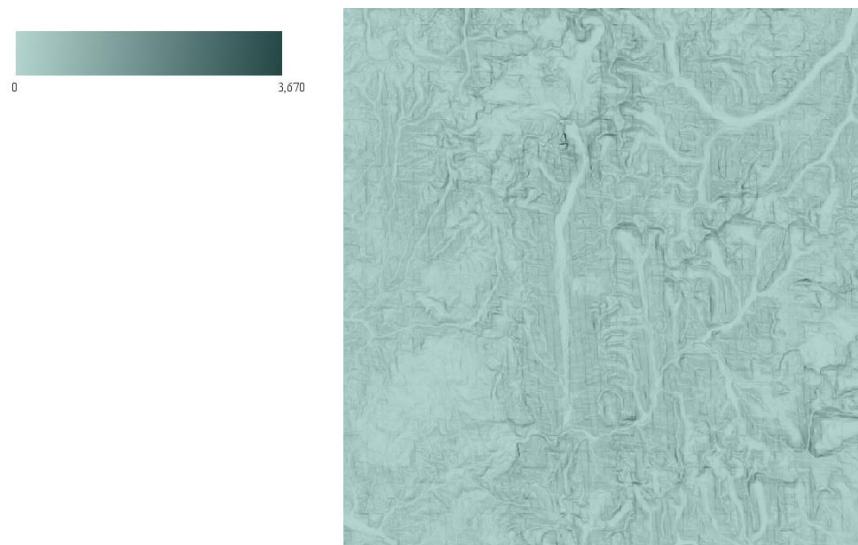
Mapa de pendientes

Figura IV.2: Mapa de Pendientes [m/m]

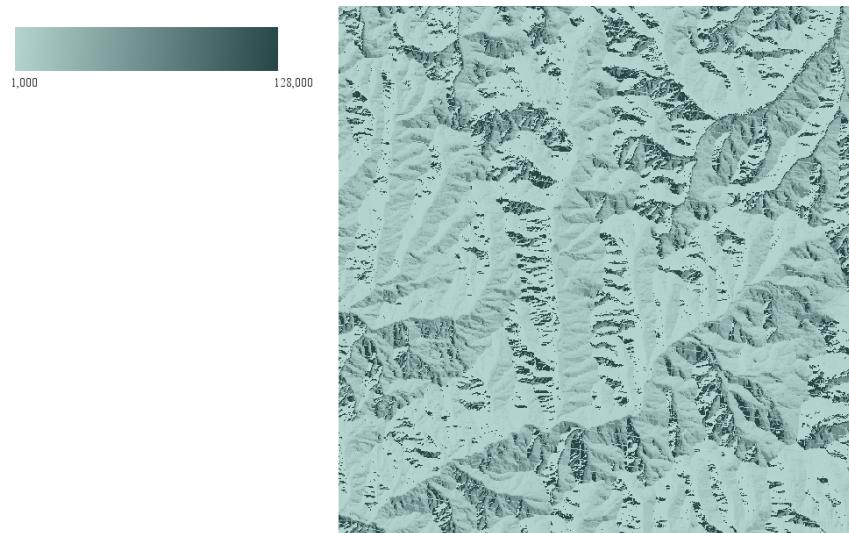
Mapa de direcciones de flujo

Figura IV.3: Mapa de Direcciones de Flujo

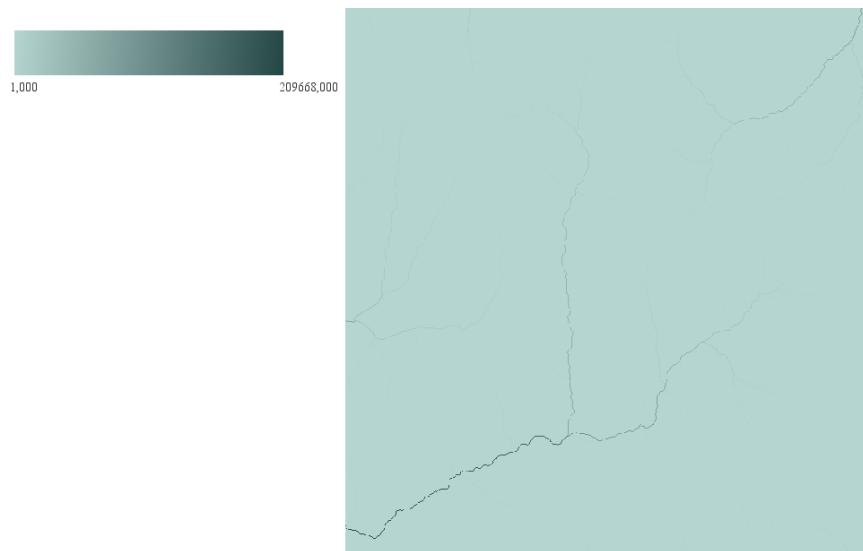
Mapa de celdas acumuladas

Figura IV.4: Mapa de Celdas Acumuladas

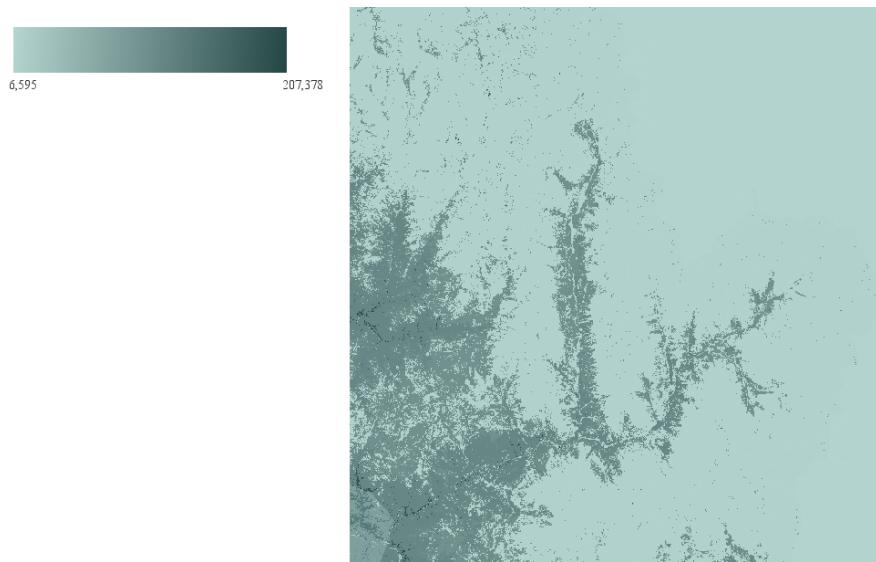
Mapa de almacenamiento estático

Figura IV.5: Mapa de Almacenamiento Estático Hu

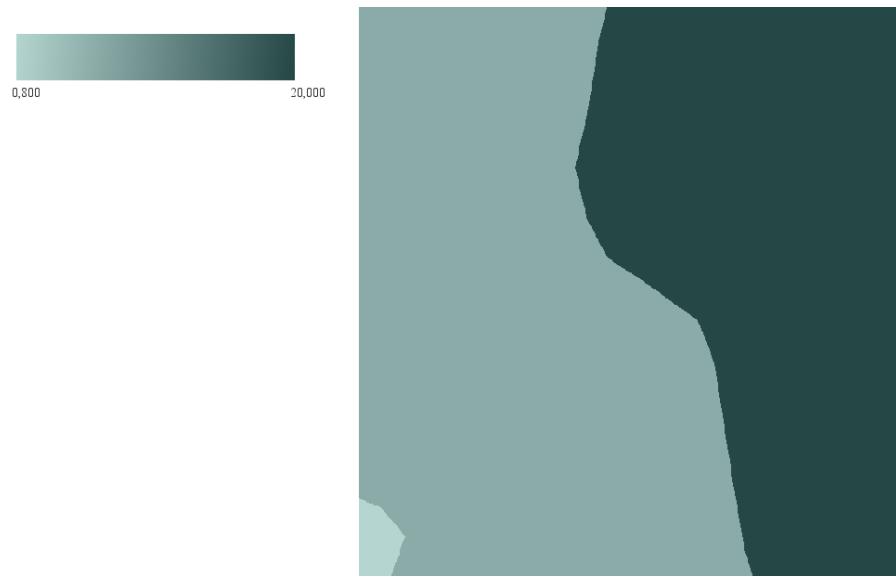
Mapa de capacidad de infiltración – Ks

Figura IV.6: Mapa de Capacidad de Infiltración Ks

Mapa de capacidad de percolación – Kp

Figura IV.7: Mapa de Capacidad de Percolación Kp

Mapa de conductividad hidráulica del interflujo - Kss

Figura IV.8: Mapa de Conductividad Hidráulica del Interflujo Kss

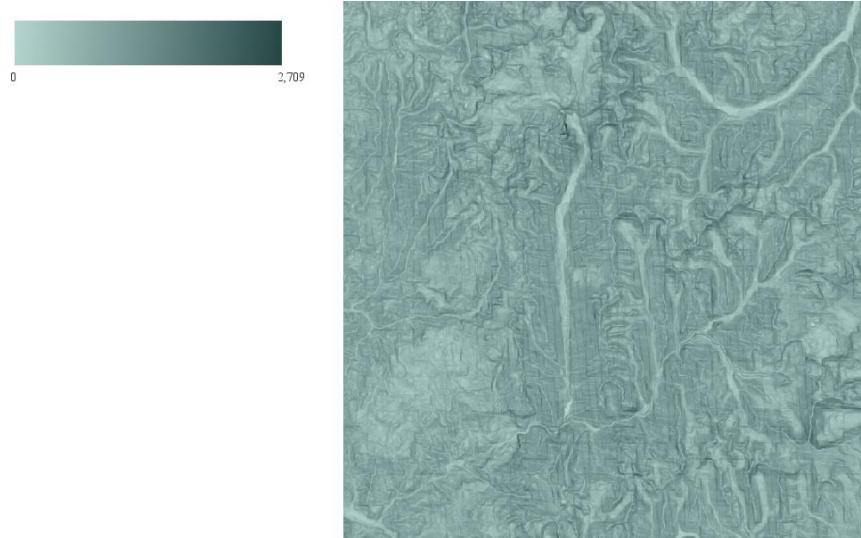
Mapa de velocidad de ladera

Figura IV.9: Mapa de Velocidad de Ladera

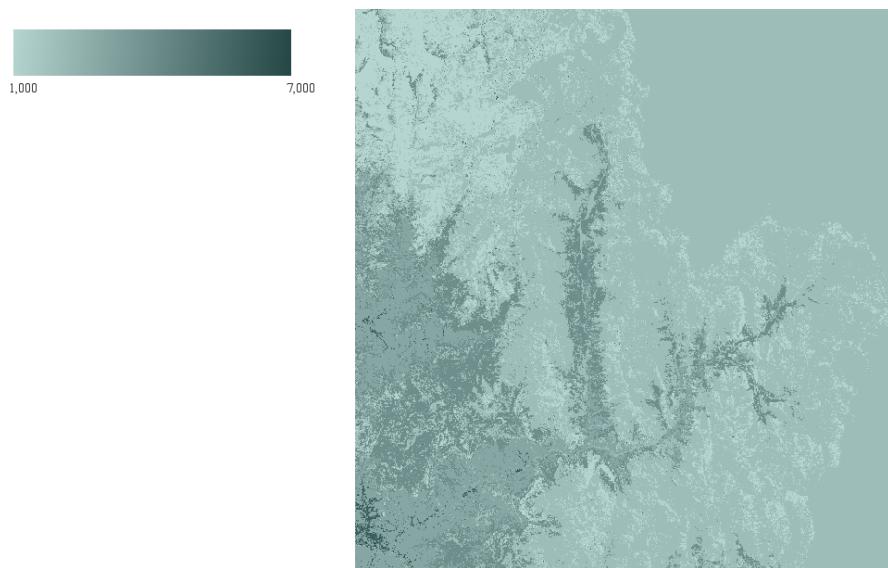
Mapa de códigos de cubierta del suelo

Figura IV.10: Mapa de Códigos de Cobertura de Suelo

ANEXO V: Diagramas de Dispersión

En esta sección se presentan los Diagramas de Dispersión completos (para un total de 500 simulaciones efectuadas) correspondientes a la Etapa 2. Se observa que la mayoría de las simulaciones entregan como resultado valores de NSE menores a 0.

Diagramas de Dispersión – Factores Correctores

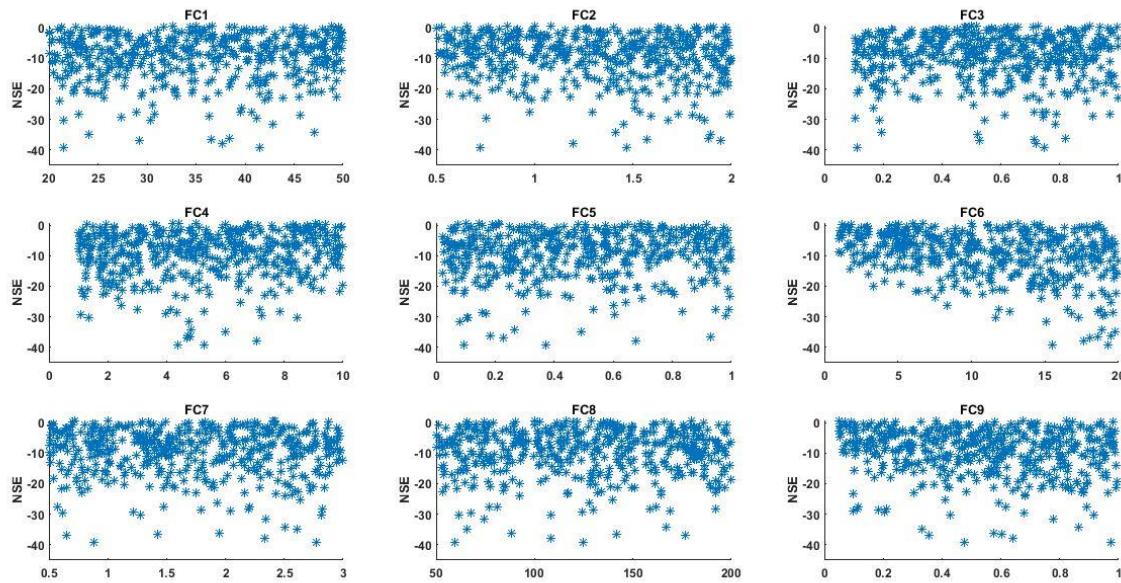


Figura V.1: Diagramas de Dispersión – Factores Correctores

Diagramas de Dispersión – Tanques de Estado Inicial

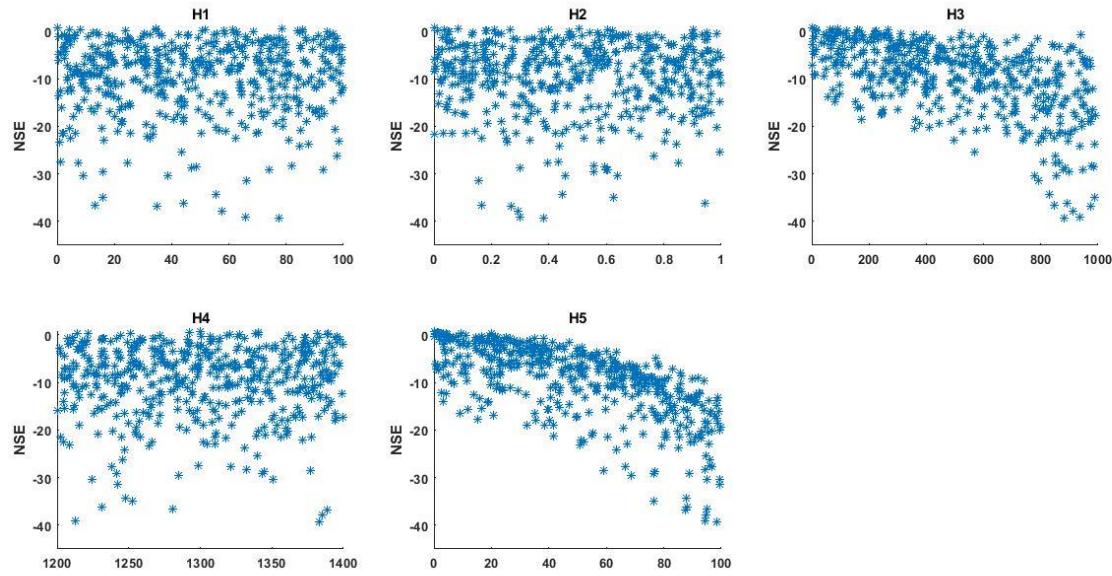


Figura V.2: Diagramas de Dispersión – Tanques de Estado Inicial

Diagramas de Dispersión – Parámetros de Fusión

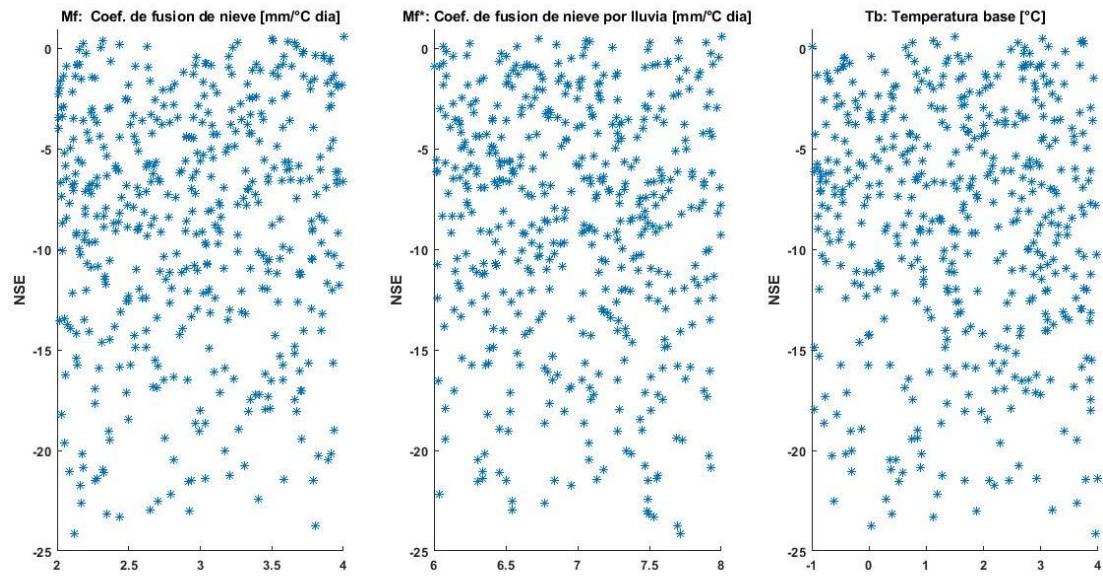


Figura V.3: Diagramas de Dispersión – Parámetros de Fusión de Nieve

ANEXO VI: Consideraciones Generales – Software TETIS

Las consideraciones generales al momento de usar el software TETIS se presentan en esta sección, con especial atención a los mapas de entrada, ya que, de no seguir las recomendaciones aquí tratadas, es posible que la simulación hidrológica no se ejecute correctamente. Además, se entregan indicaciones respecto de los pasos a seguir para la generación del archivo TETIS.

Mapas de entrada – Software TETIS

- > Todos los mapas deben tener la misma resolución en formato ráster.
- > El software TETIS requiere los mapas de entrada en formato ASCII.
- > El mapa de celdas acumuladas y el mapa de direcciones de flujo deben ser compatibles con la ubicación de la estación fluviométrica (ver Figura VI.1). De esta manera el software define la cuenca en forma automática.

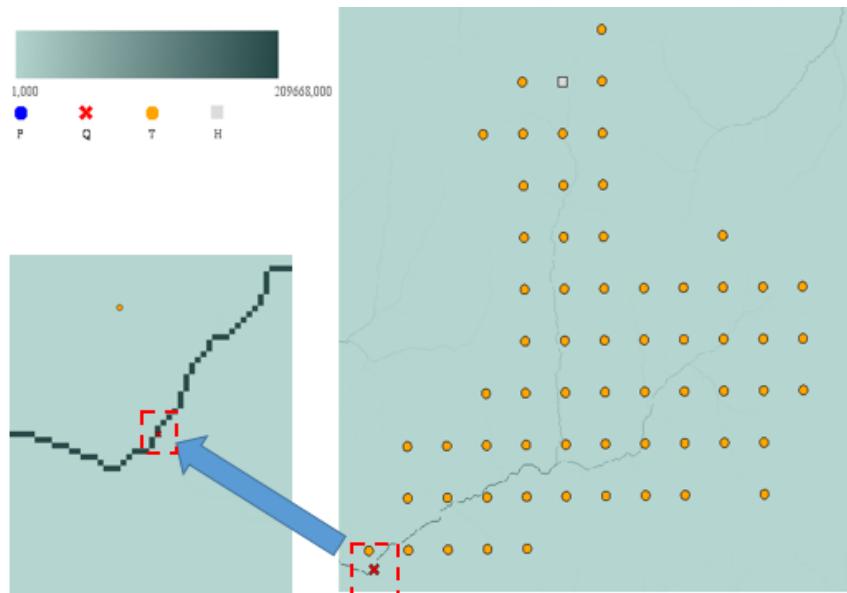


Figura VI.1: Ubicación Estación Fluviométrica en Mapa de Direcciones de Flujo

Indicaciones generales Software TETIS

La simulación hidrológica con el software TETIS se puede comprender como la aplicación de los siguientes macroprocesos: *Configuraciones generales*, *Pasos intermedios* y *Calibración del Modelo*. Los alcances de cada macroproceso se detallan a continuación, además de un esquema con los macroprocesos que se muestra a continuación:

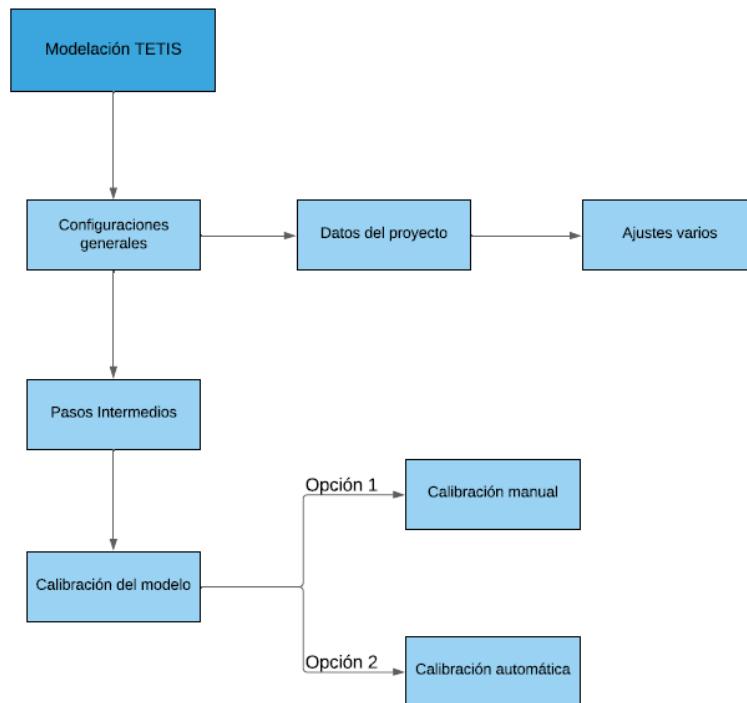


Figura VI.2: Esquema General Modelación Software TETIS

- > **Configuraciones generales:** Contempla todas las configuraciones de la ventana del menú de proyecto, en donde se ingresan los datos del proyecto y la activación de los procesos adicionales que participan en el modelo. Este proceso culmina al pulsar el botón “Guardar proyecto y salir”, en donde se crean todos los ficheros del modelo en forma automática.
- > **Pasos intermedios:** Consiste en los pasos intermedios a realizar cada vez que se varíen los datos de entrada del modelo TETIS, y que culmina con el proceso de lanzar la simulación. El proceso más importante a destacar es la generación del fichero TOPOLCO.SDS. En la figura que se muestra a continuación se esquematizan los pasos a seguir:



Figura VI.3: Pasos Intermedios Variación Datos de Entrada

- > **Calibración del modelo:** Corresponde al proceso de calibración del modelo TETIS, en donde se cuenta con dos alternativas para su ejecución, esto es: *Calibración manual* y *Calibración Automática*. También existen otras alternativas como la *Calibración multi-evento* que no es tratada en este trabajo, pero se puede consultar en el *Manual de Usuario* del software TETIS.